



UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA
DEL PERÚ

Facultad de Ingeniería

Trabajo de Investigación

“Influencia del biogás en motores de combustión interna Diésel”

Autores: Ponce Sánchez, Jesús - 1510845

Choque Leñaño, Cesar - 1511398

Para obtener el Grado de Bachiller en:
Ingeniería Mecánica

Lima, julio del 2019


ANEXO 6

**Declaración de Autenticidad y No Plagio
(Grado Académico de Bachiller)**

Por el presente documento, yo Jesús Ponce Sanchez,
identificado/a con DNI N° 43374760, egresado de la carrera de
Ingeniería Mecánica,
informo que he elaborado el Trabajo de Investigación denominado
" Influencia del biogas en Motores de
Combustión Interna Diesel
",
para optar por el Grado Académico de Bachiller en la carrera de
Ingeniería Mecánica,
declaro que este trabajo ha sido desarrollado íntegramente por el/los autor/es que lo suscribe/n y afirmo
que no existe plagio de ninguna naturaleza. Así mismo, dejo constancia de que las citas de otros autores han
sido debidamente identificadas en el trabajo, por lo que no se ha asumido como propias las ideas vertidas
por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos como en Internet.

Así mismo, afirmo que soy responsable solidario de todo su contenido y asumo, como autor, las
consecuencias ante cualquier falta, error u omisión de referencias en el documento. Sé que este
compromiso de autenticidad y no plagio puede tener connotaciones éticas y legales. Por ello, en caso de
incumplimiento de esta declaración, me someto a lo dispuesto en las normas académicas que dictamine la
Universidad Tecnológica del Perú y a lo estipulado en el Reglamento de SUNEDU.

Miércoles, 17 de Julio de 2019.


(firma)

ANEXO 6

**Declaración de Autenticidad y No Plagio
(Grado Académico de Bachiller)**


Por el presente documento, yo Cesar Choque Leño
identificado/a con DNI N° 46690780, egresado de la carrera de
Ingeniería Mecánica
informo que he elaborado el Trabajo de Investigación denominado
" Influencia del biogás en motores de
Combustión Interna Diesel

para optar por el Grado Académico de Bachiller en la carrera de
Ingeniería Mecánica

declaro que este trabajo ha sido desarrollado íntegramente por el/los autor/es que lo suscribe/n y afirmo que no existe plagio de ninguna naturaleza. Así mismo, dejo constancia de que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo, por lo que no se ha asumido como propias las ideas vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos como en Internet.

Así mismo, afirmo que soy responsable solidario de todo su contenido y asumo, como autor, las consecuencias ante cualquier falta, error u omisión de referencias en el documento. Sé que este compromiso de autenticidad y no plagio puede tener connotaciones éticas y legales. Por ello, en caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a lo dispuesto en las normas académicas que dictamine la Universidad Tecnológica del Perú y a lo estipulado en el Reglamento de SUNEDU.

Miércoles, 17 de Julio de 2019.


.....
(firma)

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realiza el estudio del comportamiento de los motores de combustión interna Diésel alimentados a biogás, realizados por diferentes autores citados en el presente trabajo. Se estableció como objetivo principal analizar la influencia del biogás en el desempeño de un motor de combustión interna Diésel operando en el modo Diésel - biogás. Enfocado principalmente en la potencia efectiva, el consumo específico de combustible y las emisiones de gases. El biogás como fuente de energía se obtiene por medio de la descomposición anaeróbica de cultivos agrícolas y desechos orgánicos. Las características físicas de este combustible proporcionan una forma de energía limpia y de gran versatilidad para la adaptación y el funcionamiento en motores Diésel.

En el Capítulo 1, se presentan los aportes de tesis e investigaciones de diversos autores frente a un problema similar. Así mismo, dichos aportes constan de un exhaustivo análisis de resultados que se han seguido para la realización del estudio.

En el capítulo 2, se presenta el marco teórico donde se encuentra los conceptos básicos, y se señalan los métodos, técnicas y enfoques de diferentes autores relacionados con el tema para desarrollar el tema que se está estudiando, y así establecer una metodología de solución.

En el capítulo 3, se formula la metodología de correlación de cada autor estudiado para el análisis de la potencia efectiva, el consumo específico de combustible y las emisiones de gases por el biogás, en un motor operando en modo Diésel-biogás.

En el capítulo 4, se analizan y discuten los resultados obtenidos mediante la interpretación de las variaciones de la potencia efectiva, consumo específico de combustible y emisiones de gases de autores en estudio.

Finalmente se establece que la sustitución del Diésel por biogás en los motores de combustión mantiene su desempeño en rangos aceptables y a su vez reduce significativamente la emisión de gases contaminantes.

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a nuestros familiares, seres queridos y docentes por el apoyo incondicional, consejos y críticas constructivas, durante nuestra formación personal y profesional, ya que nos llevaron a cumplir con nuestros objetivos.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, expresar el agradecimiento a los docentes de nuestra casa de estudios, por la dedicación para el desarrollo del presente trabajo, por el respeto y sugerencias que hicieron posible el cumplimiento del objetivo personal y profesional plasmado en el presente trabajo de investigación.

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
INTRODUCCIÓN.....	v
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Combustibles.....	5
2.1.1 Clasificación de los combustibles.....	5
2.1.2 Propiedades y parámetros de los combustibles.....	6
2.2 Diésel.....	7
2.2.1 Propiedades del Diésel.....	8
2.3 Biogás.....	9
2.3.1 Propiedades del biogás.....	9
2.3.2 Contaminantes típicos del biogás.....	10
2.3.3 Aplicación del biogás.....	12
2.4 Motor de combustión interna (M.C.I.).....	13
2.4.1 Motores de encendido por compresión (M.E.C.).....	14
2.4.2 Formas de inyección - Diésel.....	14
2.4.3 Sistemas de inyección de un M.E.C.....	16
2.4.4 Forma de inyección – biogás.....	17
2.4.5 Rendimiento y emisiones en un M.C.I.....	18

2.5 Parámetros de desempeño y emisiones de gases	20
2.5.1 Potencia efectiva.....	20
2.5.2 Consumo específico de combustible	20
2.5.3 Emisiones de gases contaminantes	21
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN	24
3.1 Características de los motores.....	24
3.2 Variación de los parámetros efectivos en los motores.....	27
3.2.1 Motor 01.....	27
3.2.2 Motor 02.....	29
3.2.3 Motor 03.....	33
3.2.4 Motor 04.....	36
3.2.5 Motor 05.....	39
3.2.6 Motor 06.....	41
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
4.1 Análisis de la potencia efectiva	46
4.2 Análisis del consumo específico de combustible.....	49
4.3 Análisis de las emisiones de gases contaminantes.....	54
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	61
Anexo 01: Ficha de Investigación.....	63
Anexo 02: Glosario	65

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la demanda de energía en el ámbito mundial está relacionada al crecimiento industrial, automotor y social. Las energías tradicionales con las que se intenta cubrir esta demanda son de uso limitado y no renovable. En el presente trabajo de investigación se analiza el uso del biogás como fuente de energía para los motores de combustión interna Diésel como fuente de impulsión mecánica para diferentes aplicaciones, en el cual se establecieron los siguientes objetivos.

OBJETIVO GENERAL

- Determinar la influencia del biogás en un motor de combustión interna Diésel.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el comportamiento de la potencia efectiva de un motor de combustión interna Diésel funcionando con combustible biogás-Diésel, y Diésel.
- Comparar la variación del consumo específico de combustible de un motor de combustión interna Diésel funcionando con combustible Biogás-Diésel, y Diésel.
- Analizar las emisiones de gases en el escape de un motor de combustión interna Diésel funcionando con combustible biogás-Diésel, y Diésel.

Para el desarrollo del presente trabajo se realizó la selección de información de fuentes confiables como; libros especializados en Motores de combustión Interna, tesis nacionales e internacionales y artículos científicos referidos a la aplicación de biogás en motores de combustión interna Diésel. Obtenidas de fuentes científicas y académicas.

Así mismo la generación de energía alternativa y limpia tiene como origen la descomposición anaeróbica de desechos orgánicos o productos agropecuarios que se

genera durante el desarrollo actividades cotidianas en una determinada población. El aprovechamiento de este tipo de energía alternativa permite analizar el comportamiento de motores duales Diésel- biogás para la generación de energía eléctrica, en lugares alejados que carecen de este beneficio. En el desarrollo del trabajo se establece las condiciones de funcionamiento óptimo de un motor Diésel operando a biogás.

Sin embargo, el poco interés nacional en el desarrollo de energía alternativo y eficiente como el biogás genera limitada información de proyectos importantes en el Perú en el que realice el estudio del uso de biogás en motores de combustión interna Diésel. Por consiguiente, la selección de autores para el presente estudio estuvo regido por el análisis de parámetros específicos, establecidos como objetivos del presente trabajo lo que direcciona la validez de los resultados sujetos a los estudios realizados en seis motores de características similares de funcionamiento.

Finalmente se comprueba el grado de factibilidad en el uso de biogás como combustible alternativo a los derivados del petróleo. Debido a que el uso del biogás se justifica principalmente por la reducción de emisiones de gases de efecto de invernadero al medio ambiente, mediante la degradación confinada de residuos orgánicos y la captación controlada de productos como el metano. Lo que justifica el interés del uso de combustibles alternativos para la generación de energía.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Los combustibles utilizados mayormente por los motores de combustión interna alternativos son líquidos y gaseosos, que son derivados del petróleo. El gasóleo se utiliza en el caso de los motores de encendido por compresión. Así mismo, los combustibles líquidos cuentan con la ventaja de transportarse de manera segura, mientras que los combustibles gaseosos por su peso específico requieren recipientes de mayores volúmenes [1].

Se propone el funcionamiento de motores diésel accionados a biogás, mediante la adaptación de una válvula dosificadora de aire-biogás en el ingreso de combustible. El análisis realizado permite la posibilidad de reemplazar hasta aproximadamente 43% de petróleo en marcha al vacío, y un 18% a plena carga. Así mismo, la opacidad en marcha al vacío, en modo dual se reduce en un 14.1% comparado con el modo Diésel hasta que la potencia generada es de 3.7KW [2].

La eficiencia de los motores que operan con combustibles alternativos presenta puntos débiles, debido al uso de biogás en un motor de combustión interna, basados en la modificación de la admisión de combustible para lograr su funcionamiento. La aplicación de estos motores se da especialmente en generadores eléctricos estacionarios, maquinaria, tractores y camiones ligeros. Las propiedades y características deseadas del combustible de biogás son analizadas enfocados en su rendimiento con condiciones específicas de trabajo. Mediante el análisis de ciertos parámetros se pone en discusión la viabilidad técnico-económica, así como el impacto en el medio ambiente [3].

La digestión anaeróbica es la degradación de material orgánico en ausencia de oxígeno, el cual produce biogás, una mezcla de metano y CO_2 . Este material orgánico puede ser obtenido del reciclaje de residuos biológicos y agrícolas. La producción de este biogás ha tomado importancia en estos últimos años debido a la recuperación de energía y cuidado del medio ambiente. Este biogás, o combustible alternativo también se aplica en los motores duales debido a que ayuda a reducir los gases contaminantes provenientes de las emisiones [4].

Los motores de combustión interna alternativos tienen gran protagonismo en el transporte, propulsión y generación de energía. Así mismo, se pueden clasificar de múltiples maneras según los parámetros de trabajo que se requieran. Entre los más importantes, considerando el proceso de combustión, se encuentra el motor de encendido por compresión, o también llamado motor Diésel. En este motor la combustión de la mezcla de combustible se da por autoencendido debido a la elevada temperatura consecuente de la compresión en la cámara de combustión [5].

Los sistemas de mezcla de motores diésel, denominados comúnmente “sistemas de inyección de combustible” están ligados a la eficiente combustión de la mezcla heterogénea que se genera en el cilindro. Existen distintos tipos de sistemas, desde los tradicionales hasta los más sofisticados y precisos como el “*common rail*”. Estos sistemas permiten alcanzar valores factibles de los parámetros como son: consumo específico, emisiones contaminantes y niveles de ruido. Este trabajo se centra en las aplicaciones, principio de funcionamiento y control de los sistemas [6].

Se hizo un estudio experimental de un motor de encendido por compresión de 6 cilindros, en modo biocombustible, en el banco de pruebas de un laboratorio de energía, se compararon parámetros como son: Potencia efectiva, presión media efectiva, consumo específico de combustible, rendimiento efectivo, rendimiento volumétrico y las emisiones. También, se logró determinar que en bajas potencias el motor reduce en

56% el consumo de combustible Diésel; y conforme se iba aumentando el suministro de gas se redujo hasta un 40% las emisiones de óxido de nitrógeno en el escape [7].

El desarrollo de la tecnología impulsa metodologías para el diseño de motores que funcionen de manera dual Diésel-Biogás mediante el acondicionamiento de un mezclador aire-biogás de Venturi fijo, para un motor Diésel turboalimentado ISUZU 4JB1. En la cual analiza diferentes parámetros involucrados en el rendimiento de un motor de combustión interna, para ello se determina la eficiencia volumétrica del motor y la relación estequiométrica aire-biogás para una composición fija de metano y dióxido de carbono en el biocombustible. Esta metodología considera las variaciones en la densidad que tiene el gas con respecto a la presión y temperatura, ajustándolos a valores comerciales para su fabricación [8].

Se analizó experimentalmente la incidencia del sistema de mezclado y la calidad del combustible piloto de un motor diésel de generación de electricidad a modo dual, que opera con biogás como combustible primario; considerando las siguientes variables: Potencia eléctrica, consumo específico de combustible, eficiencia efectiva, rendimiento volumétrico y dosado relativo. Los resultados obtenidos fueron que al utilizar el biodiesel como piloto en un 70% de sustitución, se logró aumentar la potencia efectiva en 7%, reducir las emisiones de CH_4 y CO en 31% y 14% respectivamente, con respecto al motor operando con Diésel como piloto [9].

Se investigó la viabilidad de precalentar la carga de admisión en un M.C.I. por compresión, que trabaja de manera dual con diésel-biogás. Se analizó bajo 2 velocidades a distintas cargas la eficiencia térmica, eficiencia volumétrica, el consumo de combustible y la temperatura de los gases de escape. Los resultados de precalentar la carga a bajos caudales de biogás, y a alta velocidad mejoran la eficiencia térmica; mientras que precalentar la carga y el aumento de caudal de biogás disminuye el consumo Diésel. Así mismo, en operaciones de baja velocidad el biogás proporciona más del 90% de liberación de energía [10].

Se analizó las condiciones óptimas de un M.C.I por compresión alimentado con biogás comprimido y diésel; para investigar la influencia del rendimiento dual Biogás-Diésel en los gases de escape. En los casos de combustión dual, la presión máxima y la tasa de liberación de calor estuvo ligeramente por debajo de la combustión diésel simple; así mismo, mostraron un rendimiento superior en la reducción de emisiones de hollín debido a la ausencia de compuestos aromáticos y menor requerimiento de aire estequiométrico. A su vez, se redujo la emisión de NO_x , en comparación del modo Diésel simple en todas las pruebas [11].

Se exploró y comparó un M.C.I. por compresión con una potencia nominal de 4.41KW, que trabaja en modo dual Biogás-Diésel y diésel puro. Para este análisis se consideró los parámetros de potencia de salida eléctrica, la eficiencia y el consumo de combustible específico. Obteniendo un valor mayor de potencia de salida en modo dual que en modo Diésel; así mismo, para todas las cargas analizadas el consumo específico es mayor en modo dual. También, al aumentar el flujo de biogás y metano se nota una reducción del número de opacidad. Analizando las pruebas se concluye que el Diésel puede ser reemplazado por el biogás en un 15.3-87.5% según las condiciones de trabajo [12].

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Combustibles

Los combustibles generalmente son derivados del petróleo, proviniendo de un origen fósil. Las materias primas fósiles se han formado a partir de plantas y restos de organismos vivos que existieron hace muchos años en la tierra, como son: el petróleo, carbón y gas natural. Así mismo, los combustibles son sustancias que reaccionan con el oxígeno, produciendo una reacción exotérmica en la que la energía química pasa a convertirse en energía térmica [1].

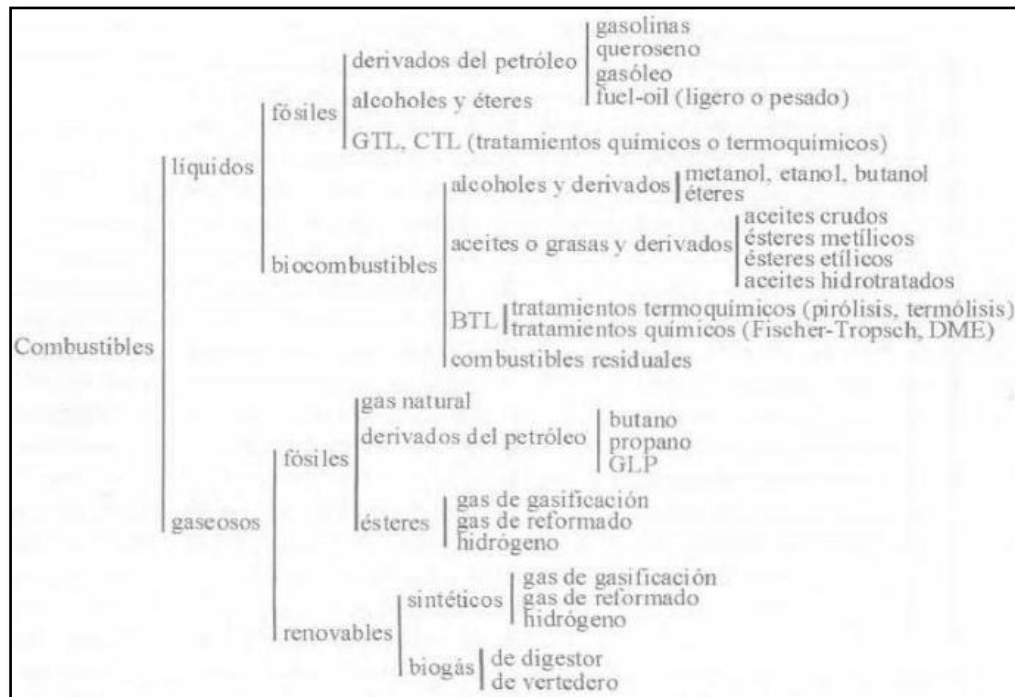
2.1.1 Clasificación de los combustibles

Se clasifican en sólidos, líquidos y gaseosos; pero por las exigencias de los motores de combustión interna (M.C.I.) en la velocidad de reacción y mezcla, se utilizan los líquidos y gaseosos.

La ventaja de los combustibles líquidos es que poseen una gran capacidad calorífica, y la seguridad de manejo para su transporte, pero, a su vez, requieren de sistemas de evaporación y mezcla con el oxígeno, ya que la combustión se da en fase gaseosa.

Por otro lado, el combustible gaseoso posee buena capacidad para mezclarse con otras sustancias gaseosas homogéneamente, y combustionar con reducidas emisiones, así mismo, tiene la desventaja de su almacenamiento debido a su gran volumen específico.

Figura N° 1: Clasificación de los combustibles [1]



2.1.2 Propiedades y parámetros de los combustibles

Es necesario conocer las propiedades de los distintos tipos de combustibles que existen para su posterior aplicación en la industria de acuerdo a los parámetros requeridos.

A continuación, se mencionan algunas propiedades fisicoquímicas de los combustibles:

- Densidad (ρ), es la masa por unidad de volumen.
- Viscosidad (ν), resistencia a fluir del fluido.
- Lubricidad, indica la capacidad lubricante.
- Inflamabilidad, indica el punto en el que el fluido combustiona.
- Volatilidad, es la tendencia a que el fluido se evapore a ciertas condiciones.
- Estabilidad, es la resistencia a la degradación durante el almacenamiento.

Por otro lado, los parámetros termoquímicos son:

- Poder calorífico, es la cantidad de energía por unidad de masa o volumen.
- Dosado estequiométrico, es la relación en peso de combustible y aire.

- Temperatura adiabática, es la máxima temperatura en una combustión completa [1].

Tabla N° 1: Poder calorífico inferior de algunos combustibles [2]

Combustible	Poder Calorífico Inferior	
	(MJ/kg)	(MJ/m³)
Metano	50,0	35,9
Biogás con 90% de CH ₄	45,0	32,3
Biogás con 60% de CH ₄	30,0	21,5
Butano	45,7	118,5
Propano	46,4	90,9
Metanol	19,9	15,9*10 ³
Etanol	26,9	21,4*10 ³
Gasolina	45,0	33,3*10 ³
Diesel	42,1	34,5*10 ³

2.2 Diésel

El combustible Diésel se caracteriza por ser hidrocarburo líquido, este tipo de combustible es comúnmente usado en motores diésel, ya que posee un poder calorífico de aproximadamente, 42.45 MJ/kg.

Este combustible tiene como característica principal ser menos inflamable a comparación de otros líquidos, esto siempre y cuando estén a presión normal, así mismo este combustible tiene la capacidad de evitar la corrosión, además limpia y protege a los inyectores. Todo esto mencionado, reduce gastos de mantenimiento y por ende provoca un mayor rendimiento en el motor [1].

2.2.1 Propiedades del Diésel

Para definir de manera clara las propiedades del Diésel, es necesario partir de la normativa del Decreto Supremo N°021-2007-EM el cual estipula que, en Perú a partir del 01 de enero del 2011, se inició la venta del combustible Diésel B5 que viene a ser una sinergia de Diésel N° 2 y un 5% de volumen de Biodiesel.

“Diésel N°2: combustible derivado de hidrocarburos, destilado medio, obtenido de procesos de refinación.”

“Biodiesel (B100): combustible diésel derivado de recursos renovables, puede ser obtenido a partir de aceites vegetales o grasas animales” [2].

El grado de cetano en el combustible diésel, indica el tiempo que tarda en quemarse este mismo, de esta manera la potencia se ve directamente afectada con esta propiedad. Así mismo los productos de la combustión mejoran considerablemente.

Los valores típicos de cetano en combustibles Diésel pueden variar desde 40 (que es la mínima según la normativa local) hasta 60 en algunos casos para motores grandes de alta eficiencia [3] .Como se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 2: Propiedades del combustible Diésel

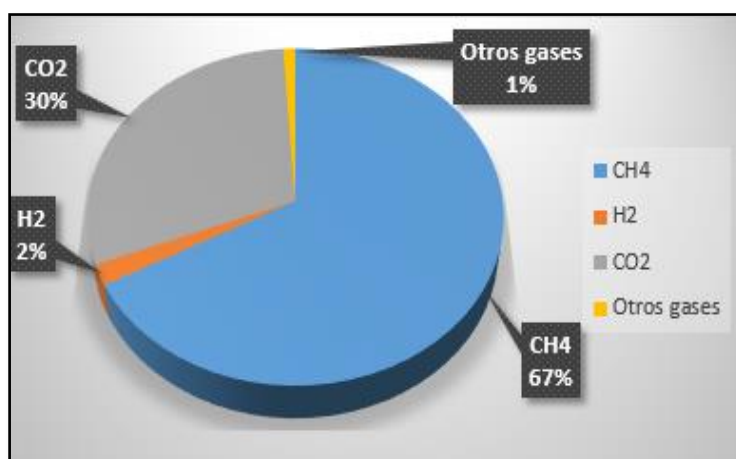
Propiedades	Valores
Densidad (N kg/m ³)	830
Velocidad de propagación de llama (cm/s)	33~47
Número de Octano	20
Número de Cetano	44-60
Temperatura de Auto-Ignición (°C)	254
Relación estequiométrica (por vol)	1:14,577
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	42,45
Viscosidad a 37,8°C (cST)	2-4

2.3 Biogás

El biogás, es un combustible gaseoso que se produce por la descomposición anaeróbica (biodegradación) de compuestos orgánicos (biomasa) en ausencia de oxígeno. Este compuesto orgánico puede ser obtenido del reciclaje de residuos biológicos y agrícolas. El proceso de fermentación se puede dar de forma natural, como, por ejemplo, en los pantanos o rellenos sanitarios o de forma controlada como en los biodigestores [4].

El biogás contiene entre 50% y 70% de CH_4 , 2% de H_2 , hasta 30% de CO_2 y otros gases (H_2S y NH_3).

Figura N° 2: Composición del biogás



2.3.1 Propiedades del biogás

Las propiedades del biogás pueden variar dependiendo del volumen porcentual de cada componente dentro de la composición de la masa a usar. El componente más importante del gas desde el punto de vista del poder calorífico es el metano (CH_4), los otros componentes no se involucran en la combustión [3].

Tabla N° 3: Propiedades del biogás

Propiedades	Valores
Densidad (kg/m ³)	0,65~0,91
Temperatura de ebullición (°C)	126~162
Número de Octano	130
Temperatura de Auto-Ignición (°C)	632~813
Dosado estequiométrico (m ³ /m ³)	5~17
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	21~28
Velocidad de propagación de llama (cm/s)	13-15

Así mismo, las propiedades termodinámicas del metano a condiciones normales (273°K y 101325 Pa) son [4]:

- Calor específico (C_p)=2.165 kJ/kg°K
- Masa Molar (M)=16.04 kg/Mol
- Densidad(ρ)=0.72 kg/m³
- Constante de gas (R)=0.518 kJ/kg°K
- Valor calorífico H_u =50000 kJ/kg°K [4].

2.3.2 Contaminantes típicos del biogás

Este tipo de gas según estadísticas contiene aproximadamente 500 contaminantes diferentes, a continuación, se menciona los que tienen mayor relevancia dentro de la aplicación durante el uso en los motores de combustión interna [4].

Gases de Azufre:

Los compuestos del azufre en especial el sulfito y sulfato son corrosivos cuando entran en contacto con el agua, estos tienen que ser eliminados para que se pueda evitar la corrosión en los tanques de almacenamiento, compresores y en motores [4].

Siloxanos:

Son siliconas volátiles, y estos se producen a partir de diferentes tipos de productos de consumo, como son: detergentes y cosméticos. La cantidad de este contaminante debe reducirse en una máxima expresión en aplicaciones en motores, debido a que este tipo de contaminante en contacto con las partes del motor causa un daño por erosión o posiblemente bloqueos [4].

Amoniaco:

Las concentraciones en cantidades altas de amoniaco pueden ser perjudiciales para los motores a gas, debido a esto los fabricantes de estos mismos, ya establecen un mínimo de cantidad de amoniaco, aproximadamente hasta 100 mg /nm³. La combustión de amoniaco conlleva a la formación de óxido nitroso, y este mismo es uno de los gases del efecto invernadero [4].

Polvo y partículas:

Las plantas de biogás necesariamente tienen filtros, que se encargan de reducir la cantidad de agua o aceite presente en el gas, siendo apropiadas las medidas de 2 a 5 micras en tamaño de mallas.

Figura N° 3: Deposito de siloxano en el cilindro de un motor [4]



2.3.3 Aplicación del biogás

El biogás es un combustible alternativo que tiene una gran variedad de aplicaciones, y también se puede utilizar como materia prima. Incluso, se puede reemplazar en casi todas las aplicaciones del gas natural [4].

Las 4 principales aplicaciones son:

- Producción de calor y vapor
- Producción y generación de electricidad
- Producción de químicos
- Combustible para vehículos

Combustión Interna

Es la tecnología más utilizada para obtener energía, que genera desde kilovatios hasta megavatios, los motores para esta aplicación pueden ser desde encendidos por chispa y lo de combustible dual, siendo estos últimos en dimensiones pequeñas, los que otorgan buenas eficiencias eléctricas.

Vehículos a gas:

El biogás puede actualizarse a calidad de gas natural y utilizarse en los mismos vehículos que usan gas natural (GNV). En cuanto a su almacenamiento se realiza en recipientes de 200 - 250 bares de presión hechos de materiales compuestos de acero o aluminio [4].

El volumen para almacenar el biogás es cinco veces más que el requerido para el combustible diésel. Así mismo, el lavado, filtrado y purificado aumenta la eficiencia de almacenamiento en un 25 a 30% [3].

Las emisiones de partículas y hollín también se reducen drásticamente, incluso en comparación con los motores Diésel modernos equipados con filtros de partículas.

Figura N° 4: Vehículo operando con adaptación para operar con gas [4]

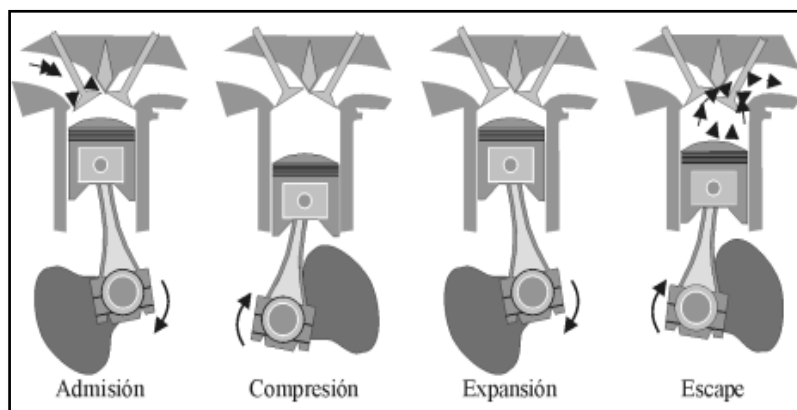


2.4 Motor de combustión interna (M.C.I.)

Un motor de Combustión Interna es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un fluido de trabajo, siendo mayormente una mezcla de aire y combustible. Esta mezcla arde dentro de una cámara de combustión, y genera movimiento en los componentes mecánicos del motor [5].

Producto del proceso de combustión, se genera un ciclo termodinámico de transferencia de energía dentro del motor, tal como se muestra en la Figura 5.

Figura N° 5: Ciclo de trabajo de un M.C.I. de 4T [5]



La calidad de los motores de combustión interna se caracteriza por lo siguiente:

- Grado de perfección en la transformación de la energía calorífica a mecánica, valoradas por el rendimiento o consumo específico de combustible y representa la

cantidad de combustible (en unidades másicas o unidades volumétricas) que se gasta en unidad de tiempo por unidad de potencia.

- Potencia del motor referida a la unidad de superficie del pistón (potencia específica).
- Sencillez de la estructura y comodidad del mantenimiento técnico.
- Arranque confiable del motor [5].

2.4.1 Motores de encendido por compresión (M.E.C.)

También conocido como motor Diésel, en este tipo de motores la combustión se origina mediante el autoencendido de la mezcla de aire y combustible, debido a la alta temperatura que se genera en la cámara de combustión como consecuencia del proceso de compresión. Así mismo, el proceso de combustión es regulado por el inyector de combustible, y es controlado por los procesos físicos que se dan en el chorro de combustible que son: Penetración, atomización, evaporación y mezcla con el aire.

2.4.2 Formas de inyección - Diésel

La inyección en este tipo de motores puede ser directa o indirecta, y esto influirá en el diseño de los pistones y la cámara de combustión, así mismo, en el rendimiento del motor y las características de las emisiones del escape [6].

Figura N° 6: Pistón de un M.C.I. de inyección directa [6]

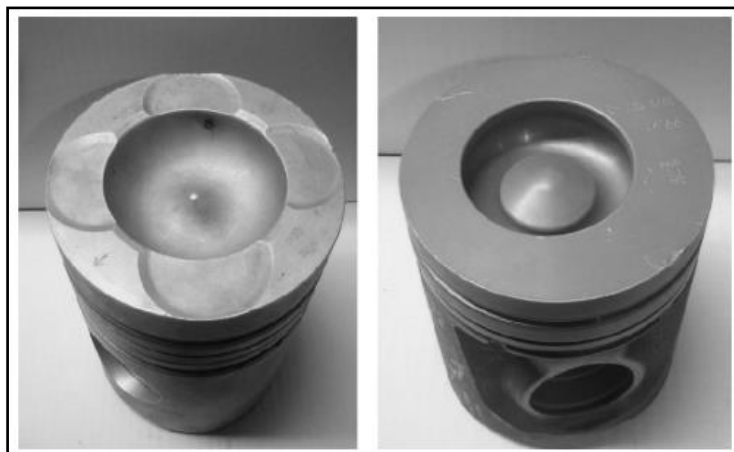


Figura N° 7: Pistón de un M.C.I. de inyección indirecta [6]



En los M.C.I. de inyección directa el combustible se inyecta directamente a la cámara de combustión; y en los de inyección indirecta, la inyección tiene lugar en la pre cámara [6].

Figura N° 8: Cámaras de un M.E.C. de inyección directa [6]

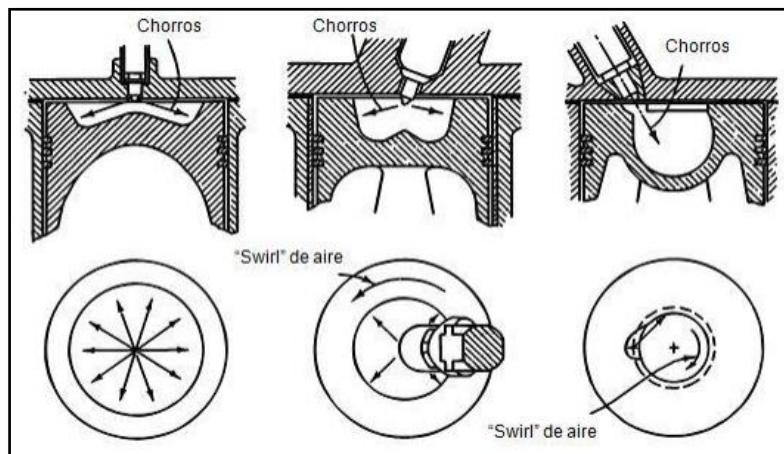
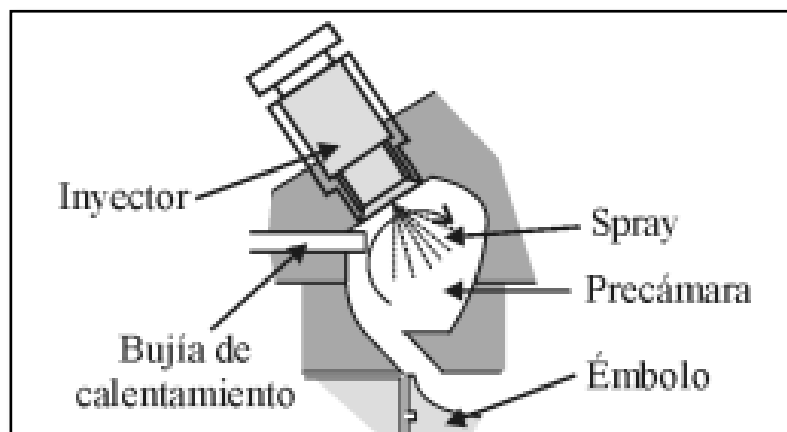


Figura N° 9: Pre cámara de un M.E.C. de inyección indirecta [5]



2.4.3 Sistemas de inyección de un M.E.C.

El sistema de inyección tiene la función de alimentar con combustible al motor, mediante una bomba inyectora que genera la presión de trabajo para suministrar combustible a un circuito de alta presión, a su vez esta bomba es alimentada por un circuito de baja presión que transporta el combustible desde el depósito de almacenamiento [6].

Existen diferentes tipos de sistemas de inyección según los requerimientos del motor como son:

Figura N° 10: Sistema con bomba de inyección en línea [6]

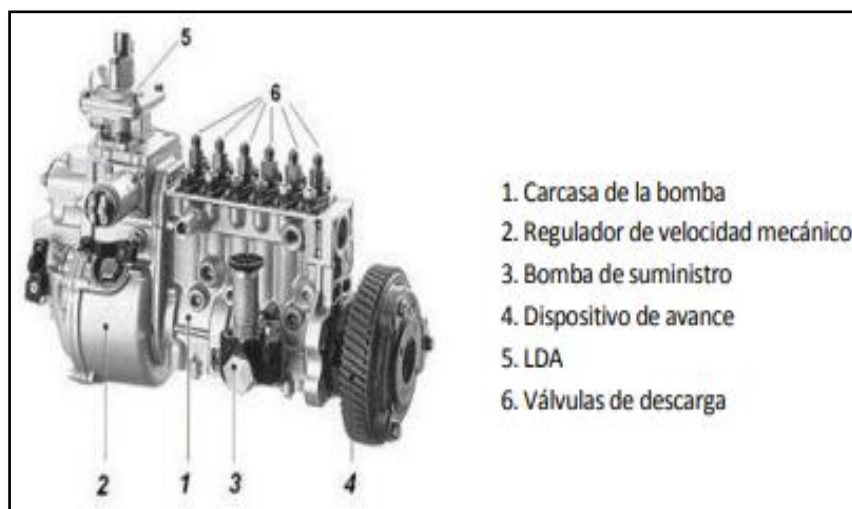


Figura N° 11: Sistema con bomba de inyección individual [6]

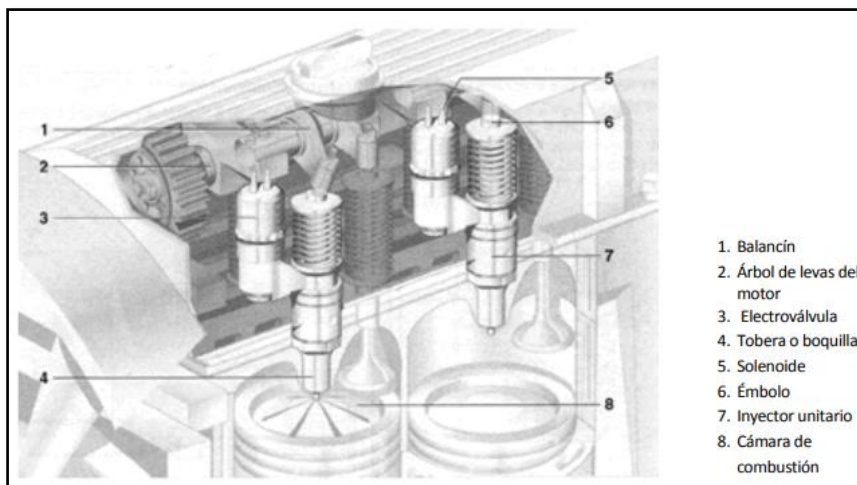
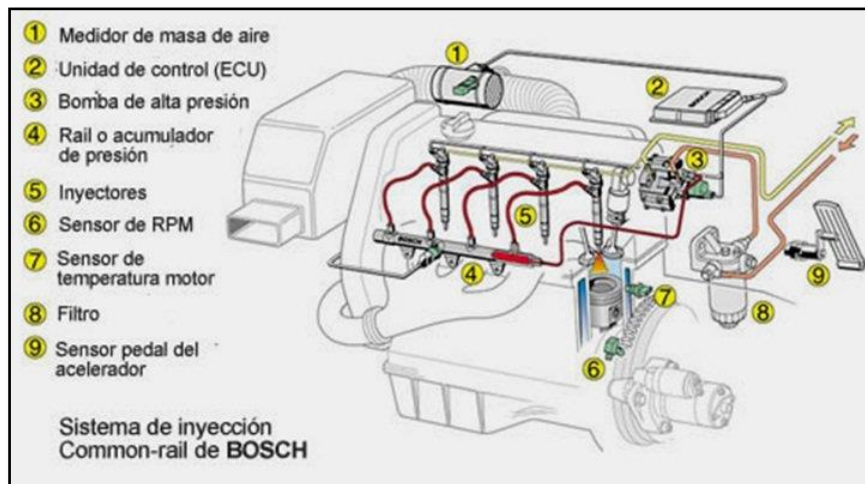


Figura N° 12: Sistema de inyección Common-Rail [7]



2.4.4 Forma de inyección – biogás

Para la inyección del biogás se toma en cuenta el tipo de motor y el diseño del sistema de admisión del combustible, el tipo más común y utilizado es un sistema de inyección denominado modelo omega. Este tipo de sistema forma parte de una de las últimas generaciones de conversión de motores de combustión interna que utiliza como fuente de energía el gas natural vehicular para su funcionamiento.

El manejo del sistema de inyección del combustible gaseoso se dará por medio de un sistema electrónico adquirido por el laboratorio. Este sistema permite modular el pulso de apertura de los inyectores en función al régimen y carga del motor. El biogás es inyectado en la línea de admisión del motor, entre el filtro de aire y el compresor [7].

Figura N° 13: Componentes que conforman el riel de inyectores de biogás [7]



Así mismo, existe otro modelo denominado mezclador aire-biogás Venturi en el cual se genera la variación de la densidad del fluido con la presión y temperatura por la geometría en el sistema de admisión. Este tipo de mezclador se diseñó para un motor ISUZU 4JB1 Diésel turboalimentado [8].

Figura N° 14: Componentes que conforman el riel de inyectores de biogás [8]



2.4.5 Rendimiento y emisiones en un M.C.I.

Se analizó la influencia de la relación de compresión sobre el rendimiento y la combustión del biogás como combustible para un MEP. Se encontró a partir de los

resultados que cuanto mayor sea la relación de compresión, mayor será el rendimiento térmico. Cuando esta se encuentra por encima de un valor crítico de 13:1, la potencia de freno y la eficiencia térmica se incrementan levemente. Entonces, se puede concluir que el aumento de la relación de compresión es fundamental a la hora de mejorar el rendimiento, ya que existe una mejora apreciable en la eficiencia térmica y en la potencia de freno. Se obtuvieron mejoras de hasta el 10 % en la potencia del motor y un aumento del rendimiento del 23 % al 26,8 % para efectos de esta prueba, esto también afecta las condiciones de comportamiento, ya que se observó una reducción en el retardo de la ignición [4].

En las siguientes figuras se observa la relación directa del consumo de combustibles como el Diésel y afines, respecto a las emisiones de los gases contaminantes directos como el dióxido de carbono, y los derivados del azufre, esto a su vez relacionado a la demanda de los combustibles tradicionales, por parte del parque automotor y en las industrias del país, cuantificados estos en un periodo de doce años.

Figura N° 15: Emisiones generadas de CO₂ respecto al consumo de energía [7]

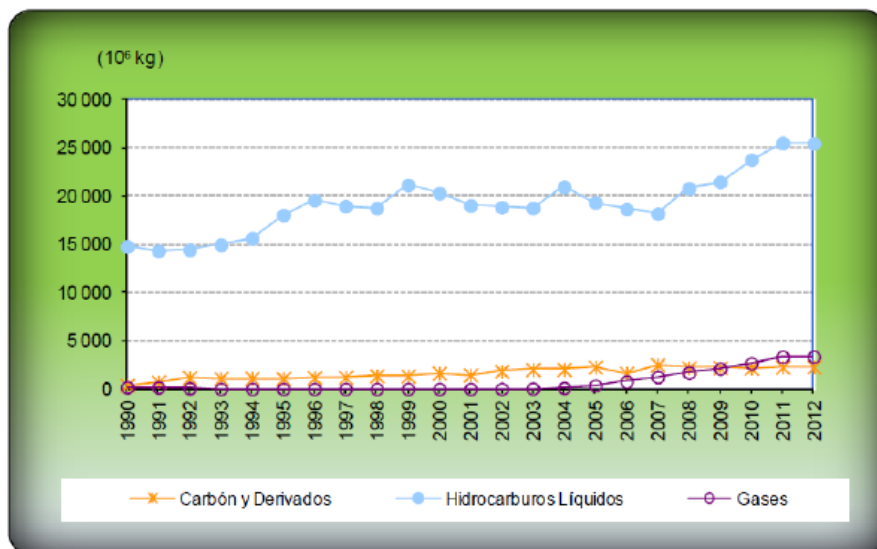
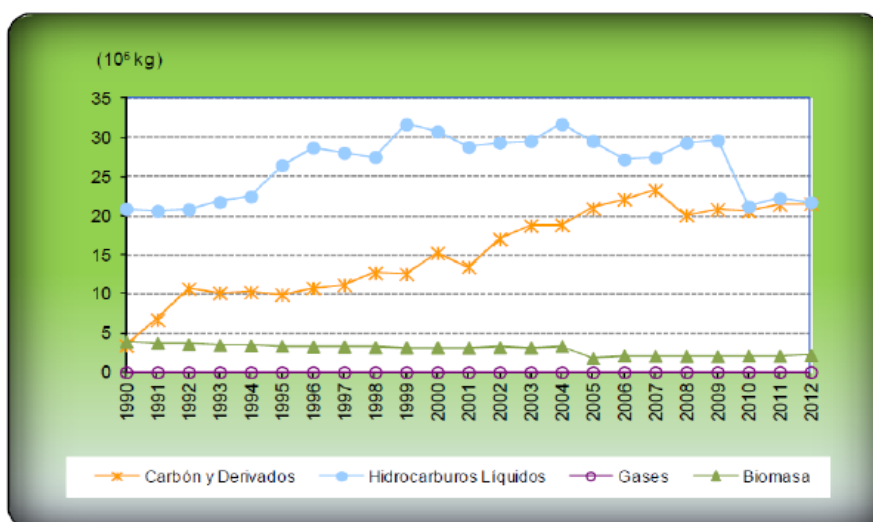


Figura N° 16: Emisiones generadas de SO desde 1990 hasta el 2012 [7]



2.5 Parámetros de desempeño y emisiones de gases

2.5.1 Potencia efectiva

La potencia efectiva es la potencia de salida del motor en el eje principal de transmisión, o potencia de frenado este parámetro depende del torque y la velocidad de giro, también se conoce como potencia al freno [7].

$$Pe = T \times 2\pi \times \frac{n}{60} \quad (1)$$

Donde:

P_e = Potencia efectiva o de salida [W]

T= Torque [N.m]

n= Régimen de giro [rpm]

2.5.2 Consumo específico de combustible

Este parámetro cuantifica la relación de combustible respecto a la potencia efectiva en un motor de combustión interna, y se define según las siguientes ecuaciones [9]:

$$sfc = \frac{mD}{Pe} \quad (2)$$

$$sfc = \frac{mDD + mB}{Pe} \quad (3)$$

Donde:

sfc = Consumo específico de combustible [g/kW.h]

mD = Consumo másico de Diésel en modo convencional [g/s]

mDD = Consumo másico de Diésel en modo dual [g/s]

mB = Consumo másico de biogás [g/s]

Pe = Potencia efectiva [W]

2.5.3 Emisiones de gases contaminantes

En la fase de escape de un motor de combustión interna se genera la expulsión de los productos gaseosos obtenidos por la reacción química del hidrocarburo carburante y el oxígeno, siendo los principales gases contaminantes el COx, NOx y HC.

Óxidos de nitrógeno

La generación de estos gases contaminantes son producto de una combustión imperfecta en la cual parte del oxígeno queda sin quemar, y debido a las altas presiones y temperaturas usadas por este tipo de motores el nitrógeno se combina con el oxígeno no quemado generando óxidos y dióxidos de nitrógeno normalmente llamados NOx que son nocivos para la salud.

Son medidas en partes por millón (ppm), e indican la cantidad de emisiones del motor por unidad de potencia [7].

$$s(NOx) = \frac{m(NOx)}{Pe} \quad (4)$$

Donde:

$s(NO_x)$ = Emisión específica [g/kW.h]

$m(NO_x)$ = Emisión de NO_x [g/h]

Pe = Potencia efectiva [W]

Óxidos de carbono

Estos gases contaminantes se generan producto de la combustión incompleta de los hidrocarburos que forman parte de combustible Diésel que generan los monóxidos y dióxidos de carbono. Siendo el más nocivo para la salud y el medio ambiente el CO [7].

Son medidas en partes por millón (ppm), e indican la cantidad de emisiones del motor por unidad de potencia [7].

$$s(CO_x) = \frac{m(CO_x)}{Pe} \quad (5)$$

Donde:

$s(CO_x)$ = Emisión específica [g/kW.h]

$m(CO_x)$ = Emisión de CO_x [g/h]

Pe = Potencia efectiva [W]

Hidrocarburos

Los hidrocarburos que se obtienen en la fase de escape, son producto de la combustión imperfecta llamados también hidrocarburos no quemados que forman parte de los gases contaminantes producidos por un motor de combustión interna Diésel.

Son medidas en partes por millón (ppm), e indican la cantidad de emisiones del motor por unidad de potencia [7].

$$s(HC) = \frac{m(HC)}{Pe} \quad (6)$$

Donde:

$s(HC)$ = Emisión específica [g/kW.h]

$m(HC)$ = Emisión de HC [g/h]

Pe = Potencia efectiva [W]

Rendimiento

El rendimiento en un motor de combustión interna Diésel está determinado por la capacidad de aprovechamiento de energía en forma útil, respecto a la energía total que se entrega producto de la combustión de los hidrocarburos que ingresan a la cámara de combustión por lo general del 35% a 45% del combustible entregado.

También se puede cuantificar mediante la relación de la potencia útil respecto a la potencia indicada la optimización de dicho parámetro está enfocado a una alta eficiencia volumétrica es decir la relación optima aire combustible que permita la combustión de la máxima cantidad de combustible respecto al aire, esto determinado por la medida del flujo de aire máximo que cada diseño de motor consigue con el fin generar la mayor potencia posible [13].

$$n = \frac{Pe}{Pi} \times 100\% \quad (7)$$

Donde:

n (%) = Rendimiento

Pe = potencia efectiva [W]

Pi = Potencia indicada [W]

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

Para el desarrollo del presente capítulo se realizó el estudio del desempeño de seis motores de combustión interna que funcionan en el modo Diésel y dual (Diésel–biogás), para lo cual se estableció un análisis correlacional de las variables de estudio como potencia efectiva, consumo específico de combustible y emisiones de gases contaminantes respecto a la relación de sustitución del combustible para determinadas condiciones de trabajo.

3.1 Características de los motores

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas de los motores en los cuales se va a analizar los siguientes parámetros: potencia efectiva, consumo específico de combustible y las emisiones de gases; trabajando en el modo Diésel y Diésel-biogás.

Motor 01

Tabla N° 4: Ficha técnica del motor 01 [2]

Designación comercial	Lister
Tipo	SL2
Potencia nominal	8,5 HP (6,34kW) a 1800 RPM
Diámetro	80,96 mm
Carrera	88,9 mm
Cilindrada	916 cc
Relación de compresión	19,5/1
Presión de inyección	150 atm. (15,19 MPa)

Consumo aproximado de combustible a plena carga y máximas revoluciones	2,7 L/h
Consumo de aceite lubricante a plena carga y máximas revoluciones	0,038 L/h
Peso neto del motor	187 kg

Motor 02

Tabla N° 5: Ficha técnica del motor 02 [7]

Designación comercial	Cummins QSB6.7
Aplicación	Vehicular
Sistema de Inyección	Common rail
Volumen barrido	6,7 l
Velocidad nominal	2200 rpm

Motor 03

Tabla N° 6: Ficha técnica del motor 03 [9]

Designación comercial	Lister Petter TR 2 4T
Número de cilindros	2
Aspiración	Natural
Refrigeración	Por aire
Cilindrada	1550 c.c.
Diámetro x carrera (mm)	98 x 101
Relación de compresión	15.5:1
Potencia nominal	20 kW a 3000 rpm
Par nominal	76 N.m a 1800 rpm

Motor 04

Tabla N° 7: Ficha técnica del motor 04 [10]

Designación comercial	-----
Diámetro	76.00 mm
Carrera	80.5 mm
Cilindrada	365.25 cc
Número de cilindros	1
Entrada de aire	Turbocargado
Relación de compresión	17.6:1
Potencia nominal	11.89 kW
Velocidad nominal	1700 rpm

Motor 05

Tabla N° 8: Ficha técnica del motor 05 [11]

Designación comercial	Kirloskar AV1 XL modelo 4T
Número de cilindros	1
Diámetro	87.5 mm
Carrera	80.0 mm
Cilindrada	481cc
Diámetro x carrera (mm)	98 x 101
Relación de compresión	17:1
Potencia máxima	5.97 kW
Torque máximo	25 N.m
Velocidad nominal	2200 rpm

Motor 06

Tabla N° 9: Ficha técnica del motor 06 [12]

Designación comercial	Tiger Diésel Engine R175 AN
Número de cilindros	1
Diámetro	75.0 mm
Carrera	80.0 mm
Relación de compresión	23:1
Potencia máxima	4.86 kW
Potencia nominal	4.41 kW
Velocidad nominal	2600 rpm

3.2 Variación de los parámetros efectivos en los motores

A continuación, se mostrarán las gráficas correspondientes de los parámetros analizados por cada autor, como son: Potencia efectiva, consumo específico y las emisiones de NO_x, CO y HC productos de la combustión.

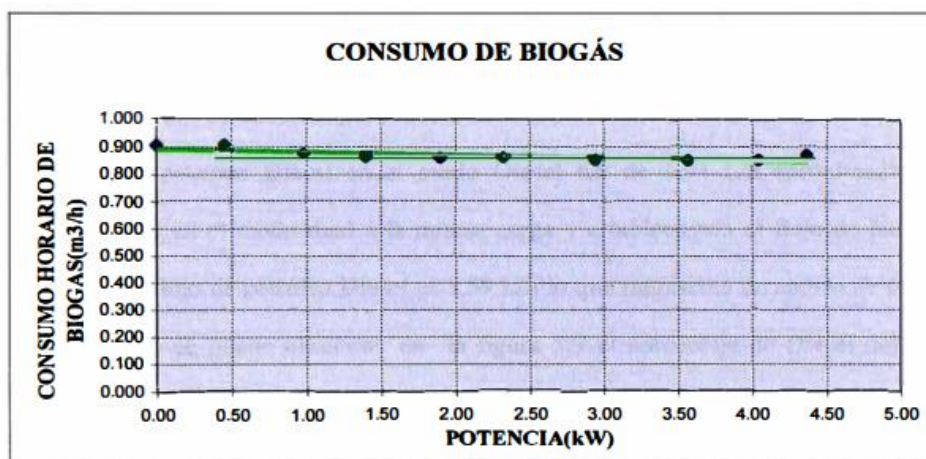
3.2.1 Motor 01

El motor trabajando en modo dual es sometido a carga máxima con 1800rpm, considerando una eficiencia de 77% del generador eléctrico, debido a esto, el motor entrega 88% de su potencia nominal, es decir 6.34 kW [2].

Consumo de combustible biogás

En esta prueba se analizó el consumo de biogás, el cual se mantuvo casi constante conforme se aumentaba la carga debido al sistema de regulación de velocidad del cigüeñal, así mismo, se puede apreciar en la Figura N° 17 que el consumo de biogás tiende a disminuir ligeramente conforme se aumenta la carga o potencia.

Figura N° 17: Variación del flujo de biogás con respecto a la potencia [2]

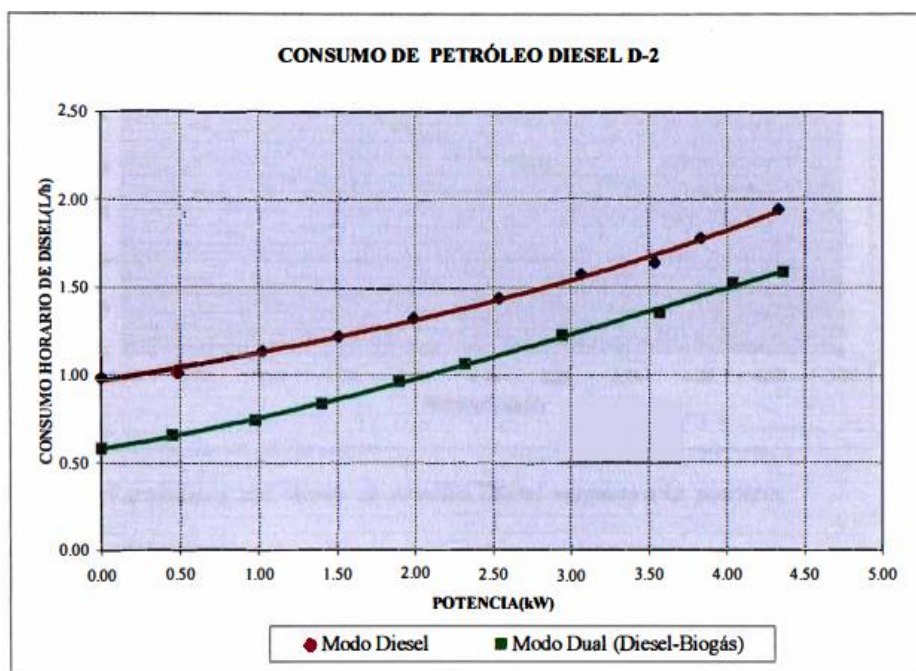


El flujo de biogás establecido para las pruebas fue de 0.87m³/h.

Consumo de combustible Diésel

En la Figura N° 18 se puede apreciar que al aplicar la carga máxima al motor el consumo de combustible en modo Diésel es de 1.94 L/h aprox., y en modo dual es de 1.59 L/h.

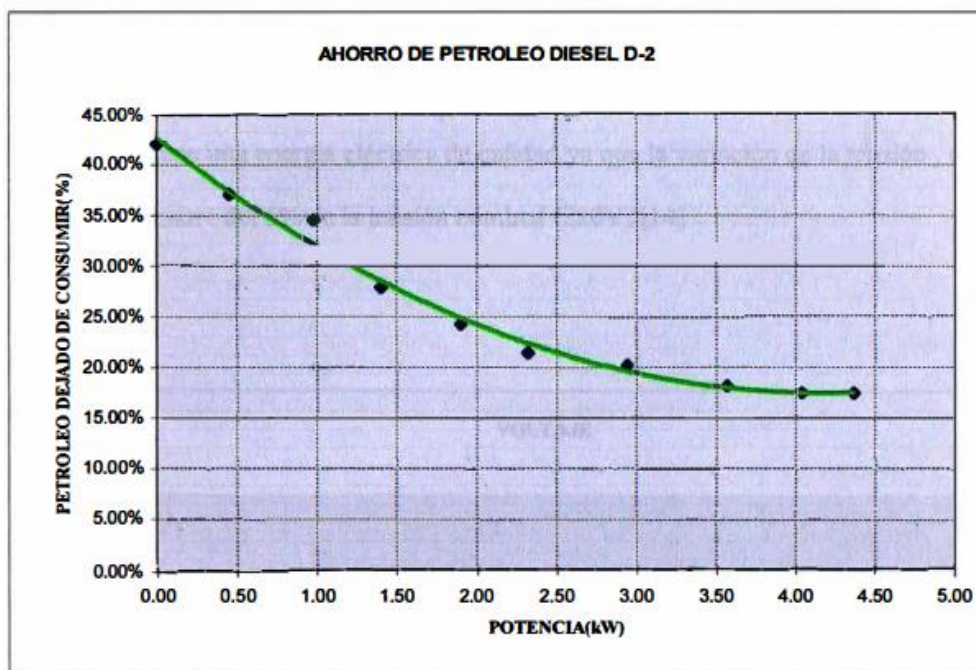
Figura N° 18: Variación del consumo de combustible Diésel con respecto a la potencia [2]



Así mismo, en la Figura N° 19 se observa que el porcentaje de combustible Diésel sin consumir parte valor de 42% disminuyendo conforme aumenta la carga, sin embargo, el

consumo de biogás de 0,87m³/h se mantiene constante, lo cual se traduce en un ahorro considerable de combustible a bajas cargas.

Figura N° 19: Variación del combustible Diésel dejado de consumir respecto a la potencia [2]



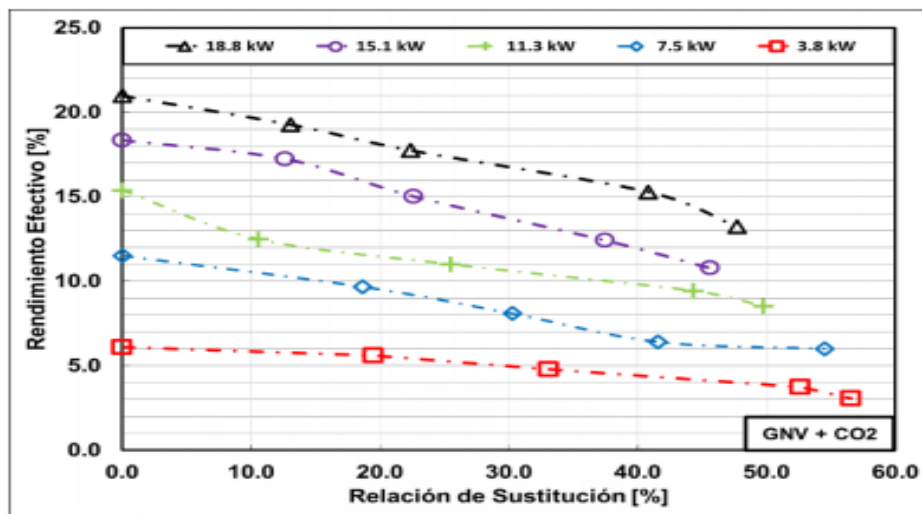
3.2.2 Motor 02

El siguiente motor analizado trabajó a 1800rpm en modo dual a diferentes cargas como son: 18.8 kW, 15.1 kW, 11.3 kW, 7.5 kW y 3.8 kW. Analizando la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás. Para este caso el GNV+CO₂ reemplazaría al biogás en 75% [7].

Potencia efectiva

En este caso se analizaron los rendimientos efectivos a distintas cargas o potencias efectivas, y como se aprecia en la Figura N°20 el rendimiento a distintas cargas disminuye conforme aumenta la relación de sustitución, esto quiere decir, que al aumentar el consumo de biogás por combustible Diésel el rendimiento tiende a disminuir.

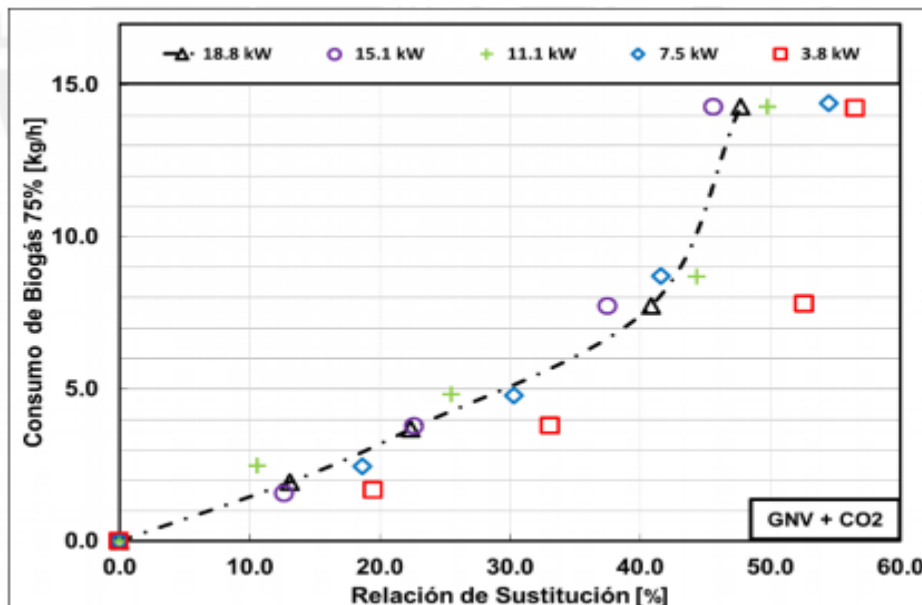
Figura N° 20: Rendimiento efectivo para el modo dual [7]



Consumo de combustible biogás

En la Figura N° 21 se aprecia que el consumo de biogás y la relación de sustitución tienden a aumentar conforme se reduce la carga. Así mismo, se obtienen valores máximos de consumo y relación de sustitución con una carga de 3.8 kW.

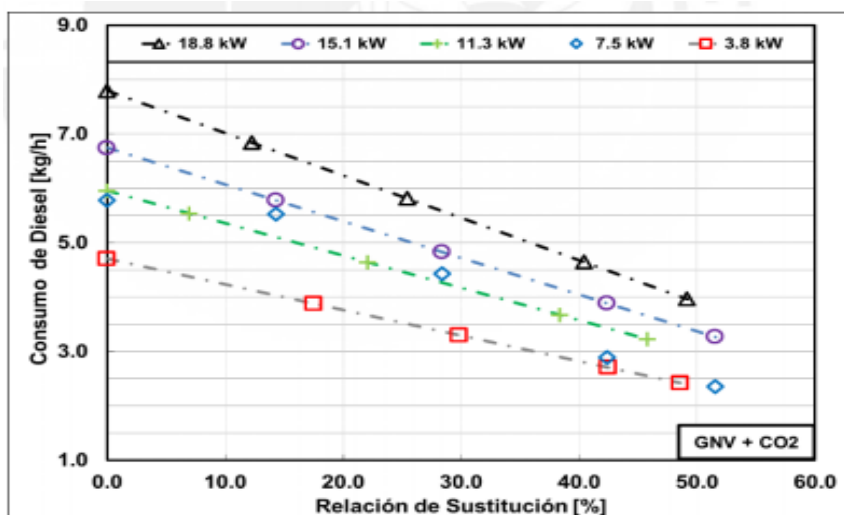
Figura N° 21: Consumo de biogás para el modo dual [7]



Consumo de combustible Diésel

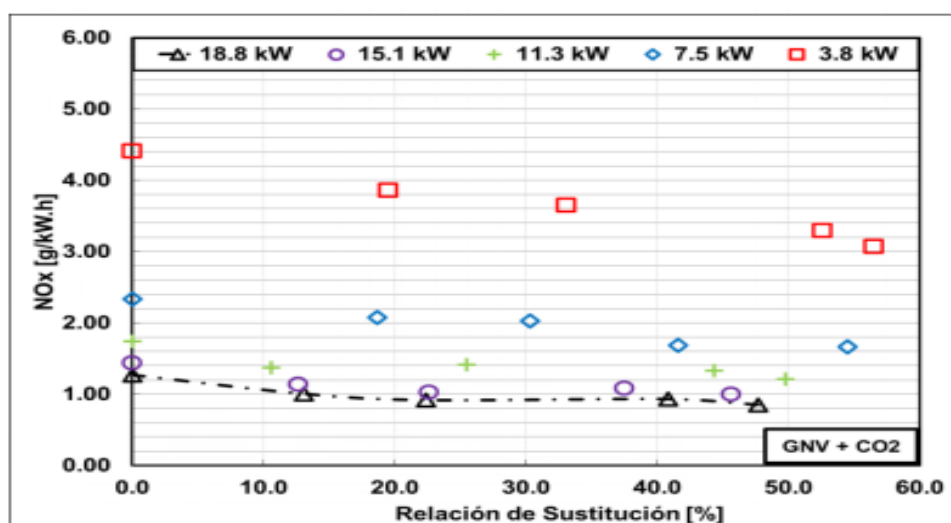
En la Figura N° 22 se observa que el consumo de petróleo se reduce hasta un 55% con una carga de 11.3 kW, esto es debido a que la energía liberada del biogás reemplaza a la del petróleo.

Figura N° 22: Consumo Diésel para el modo dual [7]



Emisiones de NO_x

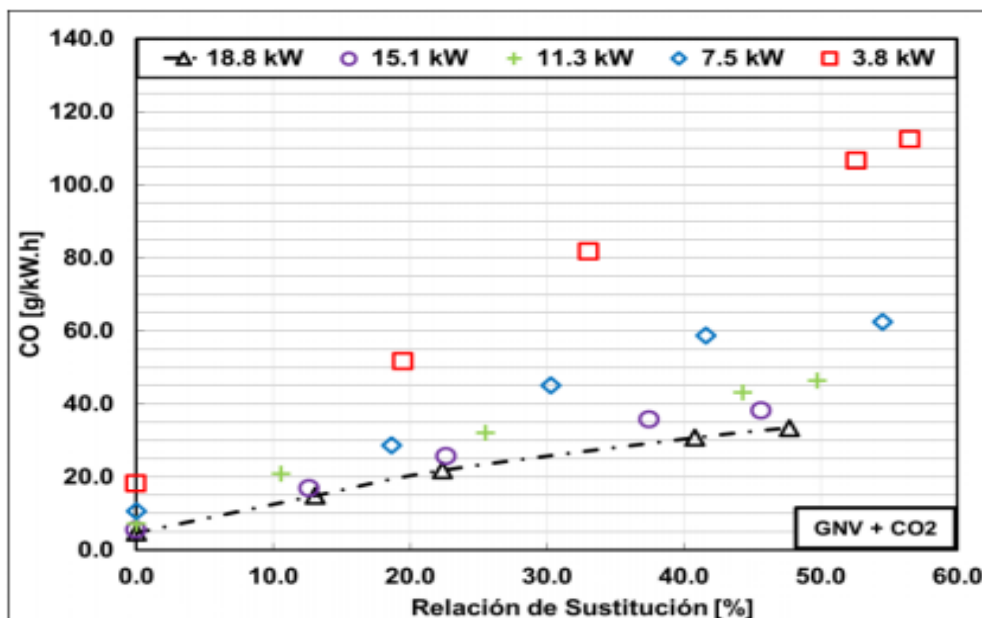
La emisión de NO_x en los gases de escape tiende a disminuir conforme se aumenta la relación de sustitución, y este valor es menor a altas cargas como se observa en la Figura N° 23. Figura N° 23: Emisiones específicas de NO_x para Diésel-biogás [7]



Emisiones de CO

Las emisiones de CO aumentan conforme se incrementa la relación de sustitución, y obtiene un valor máximo con una carga de 3.8 kW como se ve en la Figura N° 24.

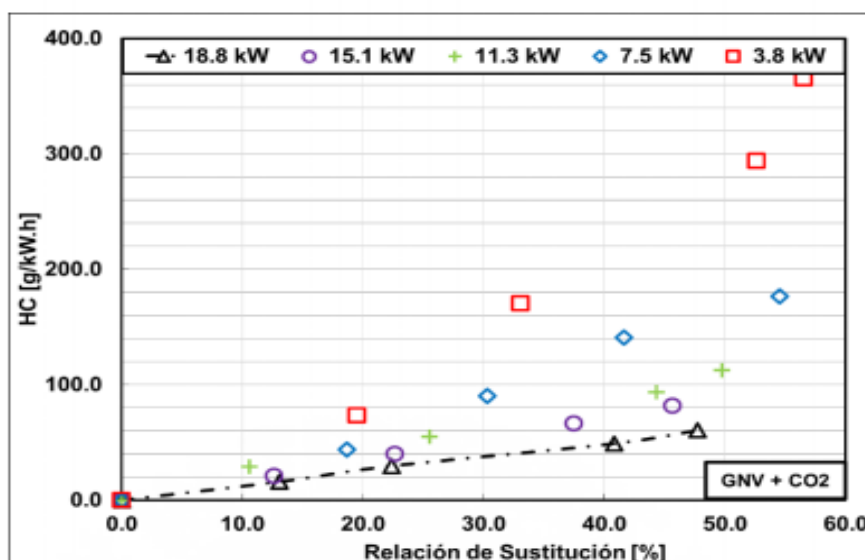
Figura N° 24: Emisiones específicas de CO para el modo dual [7]



Emisiones de HC

Las emisiones de Hidrocarburos (HC) aumentan conforme se incrementa la relación de sustitución y se reducen las cargas como se ve en la Figura N° 25.

Figura N° 25: Emisiones específicas de HC no quemados en modo dual [7]



3.2.3 Motor 03

Para el análisis de los parámetros de este motor se consideraron los valores de la siguiente tabla:

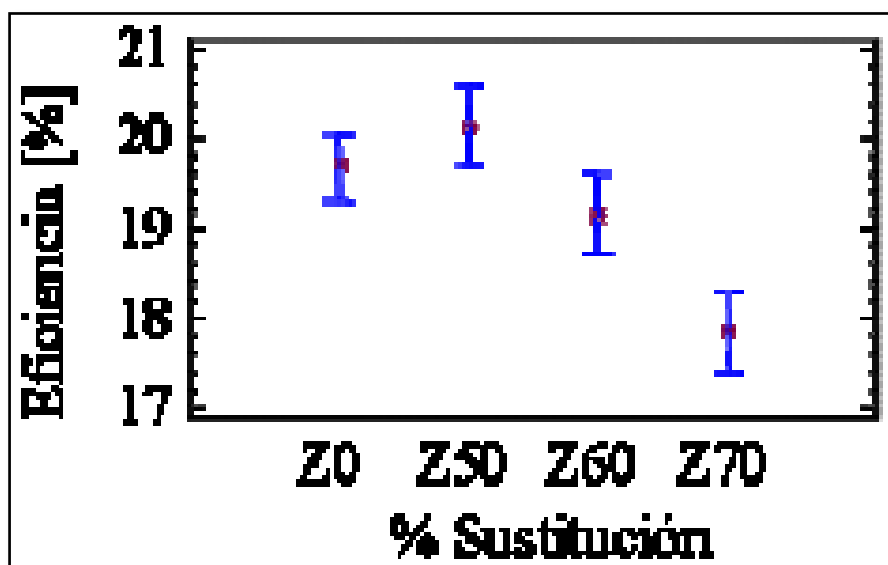
Tabla N° 10: Tabla de valores para el análisis [9]

Factor	Característica Nivel			Designación nivel
Nivel de sustitución	Reducción del 50 % del consumo en diesel			Z50
	Reducción del 60 % de consumo en diesel			Z60
	Reducción del 70 % de consumo en diesel			Z70
Modo de operación	n (rpm)	% de Carga	Ne (kWe)	Modo
	1800	40	2,7	M1
		50	3,6	M2
		70	5,2	M3
		100	7,3	M4

Potencia efectiva

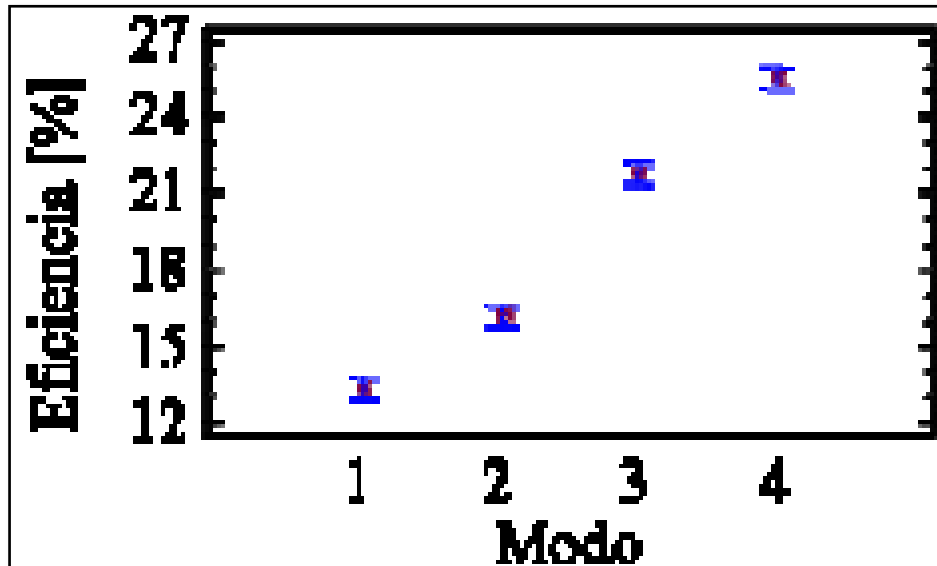
Se ve que conforme aumenta el nivel de relación de sustitución de combustible Diésel por biogás, la eficiencia se reduce como se aprecia en la Figura N° 26.

Figura N° 26: Eficiencia a distintos niveles de sustitución [9]



Así mismo, se observa en la Figura N° 27, que conforme aumenta la potencia o carga del motor la eficiencia tiende a aumentar.

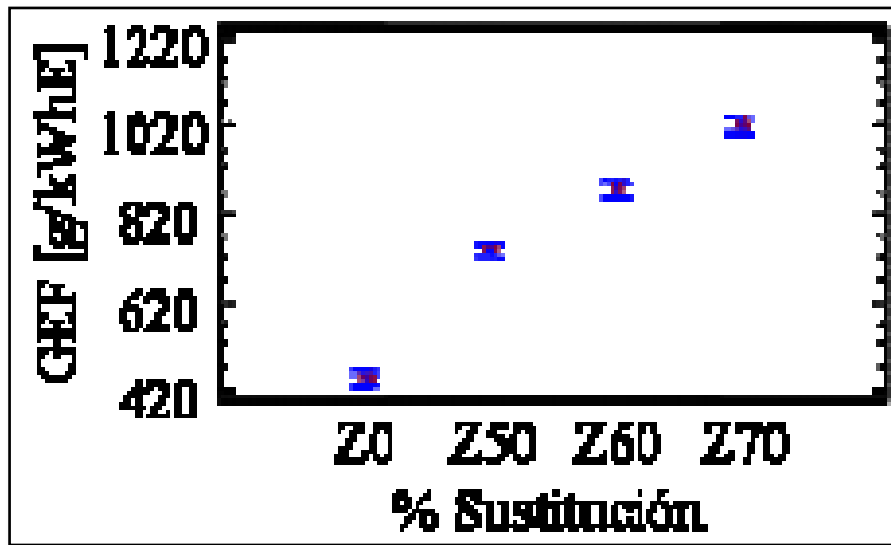
Figura N° 27: Eficiencia a distintos modos de operación [9]



Consumo de combustible Diésel y biogás

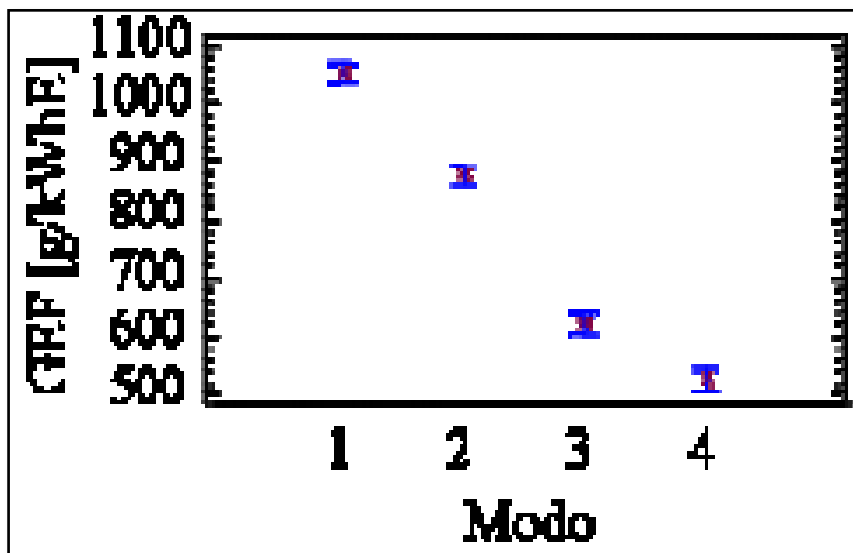
La Figura N° 28 muestra la variación del GEF (Consumo específico de combustible Diésel y biogás) para los distintos niveles de relación de sustitución, se puede observar que el consumo específico de combustible aumenta conforme se aumenta la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás. Para lo cual el Z0 representa 0% de sustitución por lo cual el combustible usado es solo Diésel, y el nivel Z70 que representa 70% de relación de sustitución respecto al modo inicial de operación.

Figura N° 28: GEF para distintos niveles de sustitución [9]



Así mismo, la Figura N°29 se muestra los valores del GEF para los distintos modos de operación o carga como se muestra en la Tabla N° 10. Se observa que el GEF disminuye conforme se aumenta la carga.

Figura N° 29: GEF para distintos modos de operación [9]

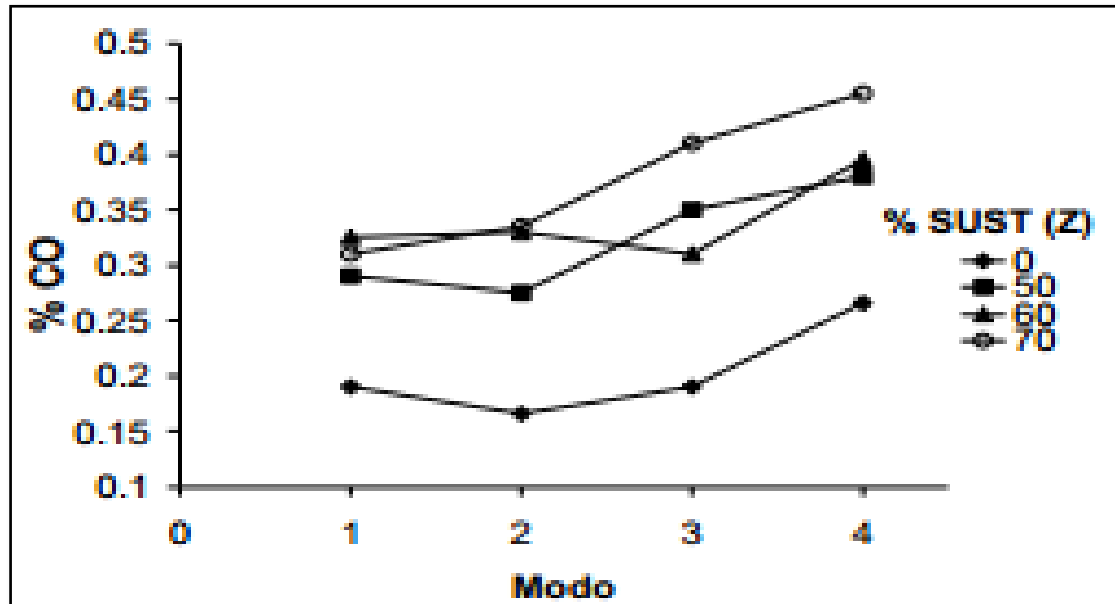


Emisiones de CO

Se observa en la Figura N°30 que al estar expuesto a mayores cargas el motor aumenta las emisiones de CO, también se aprecia que la mayor diferencia de emisión de CO

respecto al Modo Diésel(Z0) y Modo Dual a un 70% de sustitución es mayor a cargas bajas.

Figura N° 30: Emisión específica CO a distintas cargas y niveles de sustitución [9]



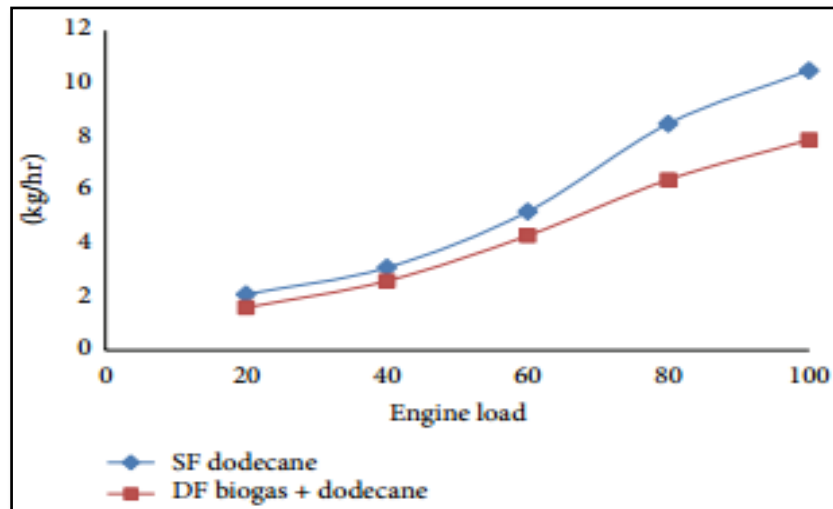
3.2.4 Motor 04

El motor en estudio trabaja a 1750 rpm y tiene una potencia nominal de 11.89kW. Así mismo, se le asignan cargas de 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de la carga nominal para el posterior análisis de los parámetros. [10]

Consumo de combustible Diésel

En la Figura N°31 se observa que el consumo de combustible Diésel aumenta conforme se incrementa la carga del motor. Además, se puede notar que el consumo de combustible Diésel a las mismas cargas es menor trabajando en modo dual respecto al modo Diésel.

Figura N° 31: Efecto del consumo en modo dual y modo Diésel a distintas cargas [10]

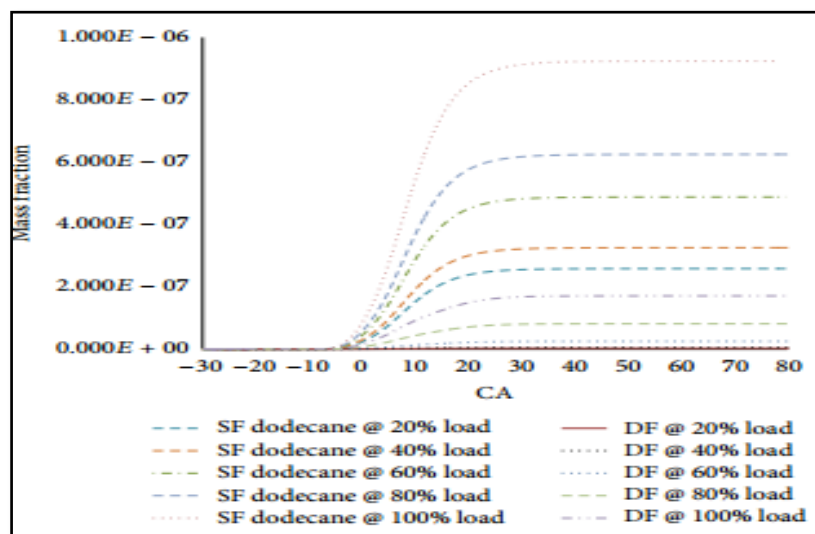


El consumo de combustible primario es el modo Diésel, denominado por el autor en específico dodecane.

Emisiones de NO_x

En la Figura N°32 se observa que cuando la carga del motor aumenta, las concentraciones de NO_x de todos los casos de prueba también se incrementan. Además, en los casos de combustión en modo Diésel resultaron mayores emisiones de NO_x que en todas las cargas del motor en comparación con los casos de modo dual.

Figura N° 32: Emisiones de NO_x en modo Diésel y dual [10]

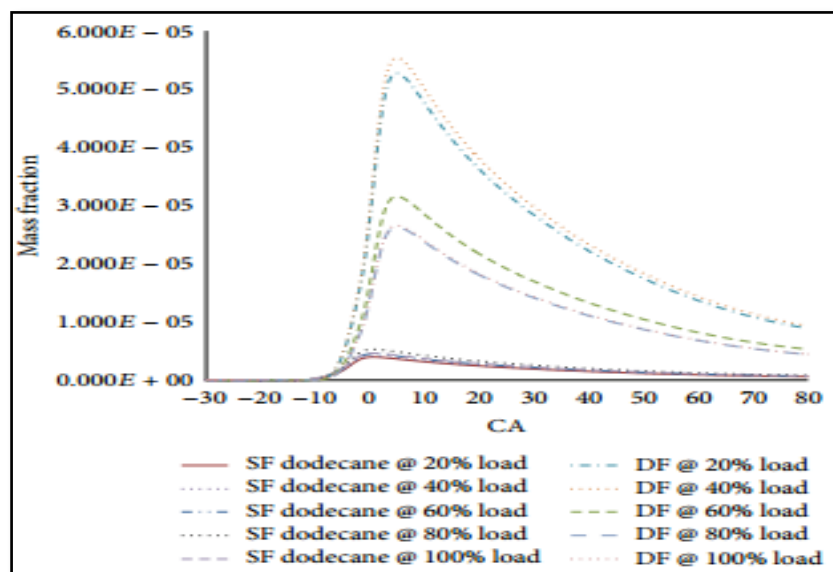


Se considera SF: *Single Fuel* (Diésel) y DF: *Dual Fuel* (Dual)

Emisiones de CO

En la Figura N°33 se aprecia el incremento de la emisión del monóxido de carbono CO en el modo Dual respecto al Modo Diésel en todas las cargas debido a que el dióxido de carbono forma parte del compuesto principal del biogás.

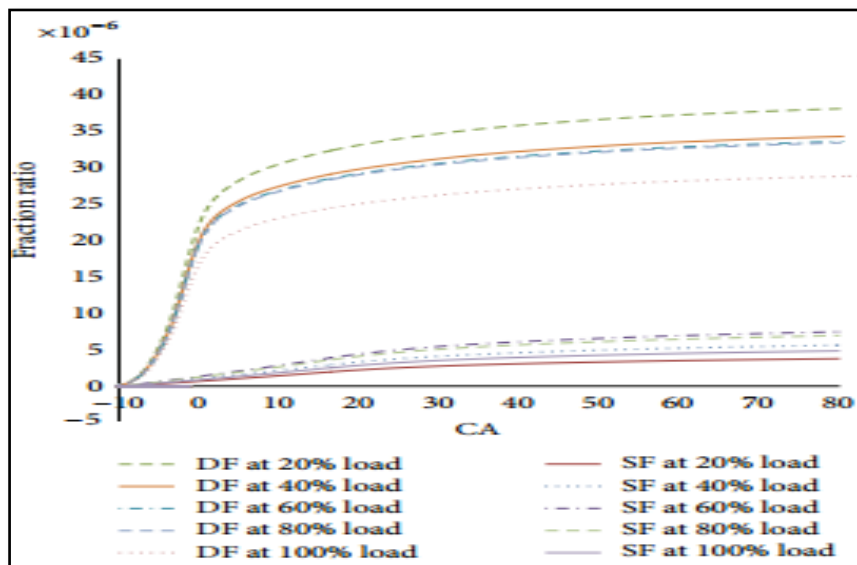
Figura N° 33: Emisiones de CO en modo Diésel y dual [10]



Emisiones de HC

En la Figura N°34 se muestra la variación de las emisiones de HC que presenta una tendencia de incremento en el Modo Dual respecto al Modo Diésel respecto a diferentes cargas durante su funcionamiento.

Figura N° 34: Emisiones de HC en modo Diésel y dual [10]



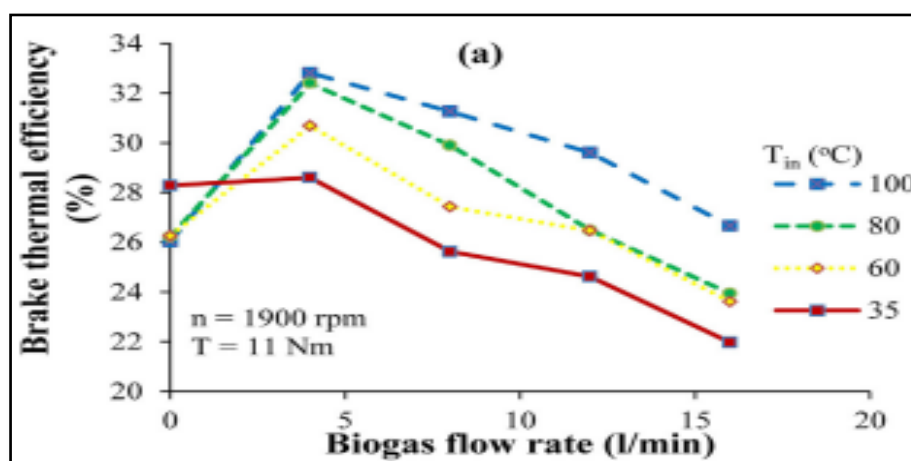
3.2.5 Motor 05

Para el estudio de este motor que trabaja a 1900 rpm y entrega un torque de 11 N.m se hizo una variación en el análisis precalentando los gases de admisión desde una temperatura de 35C° a 100C° [11].

Potencia efectiva

La Figura N° 35 muestra que el máximo rendimiento efectivo se encuentra con un flujo de biogás de 4L/min en todas las temperaturas de admisión, a partir de ese punto el rendimiento tiende a disminuir conforme aumenta el caudal de biogás. Además, el precalentamiento sin flujo de biogás (modo Diésel) disminuye el rendimiento. Sin embargo, el precalentamiento aumenta significativamente el rendimiento.

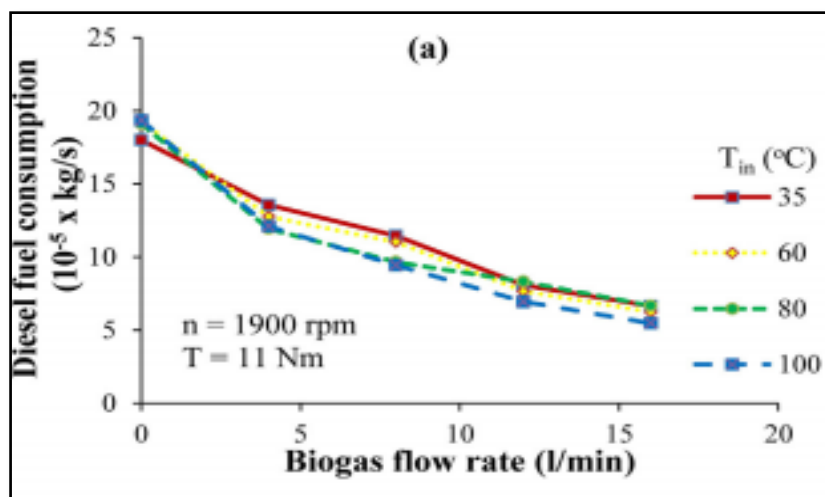
Figura N° 35: Variación del rendimiento efectivo [11]



Consumo de combustible Diésel

Se observa en la Figura N°36 que el consumo de combustible Diésel disminuye conforme se aumenta el flujo de biogás en todas las temperaturas de admisión. Además, el precalentamiento a bajas cargas disminuye el consumo de combustible Diésel si se toma en cuenta la temperatura más alta y baja.

Figura N° 36: Variación consumo Diésel [11]

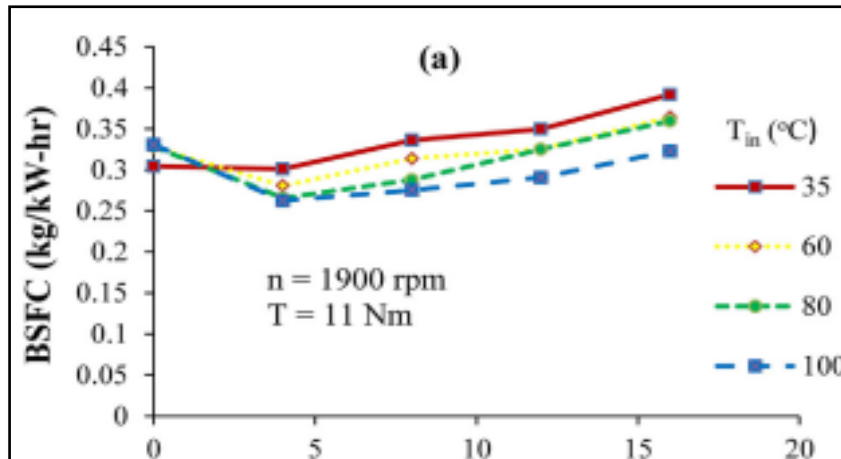


Consumo de combustible Diésel y biogás

En la Figura N° 37 se observa que el consumo específico de combustible Diésel y biogás es menor cuando el flujo de biogás también lo es a altas temperaturas. Además, se

aprecia que el aumento de flujo de biogás tiende a aumentar el consumo específico en todas las temperaturas. Así mismo, el precalentamiento proporciona una disminución de consumo de Diésel de un 10% a 20% a una temperatura de 100C° con respecto a 35C°.

Figura N° 37: Variación consumo Diésel y biogás [11]



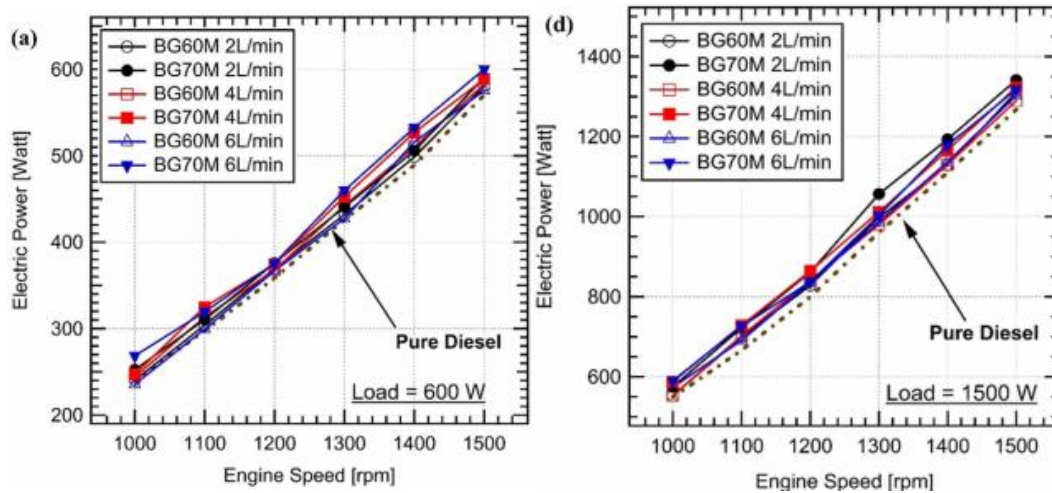
3.2.6 Motor 06

Para este estudio el motor operó con una carga de 600W y 1500W constantes; y trabajó con 2 tipos de biogás, BG60M (60% metano y 40% CO₂) y BG70M (70% metano y 40% CO₂) [12].

Potencia efectiva

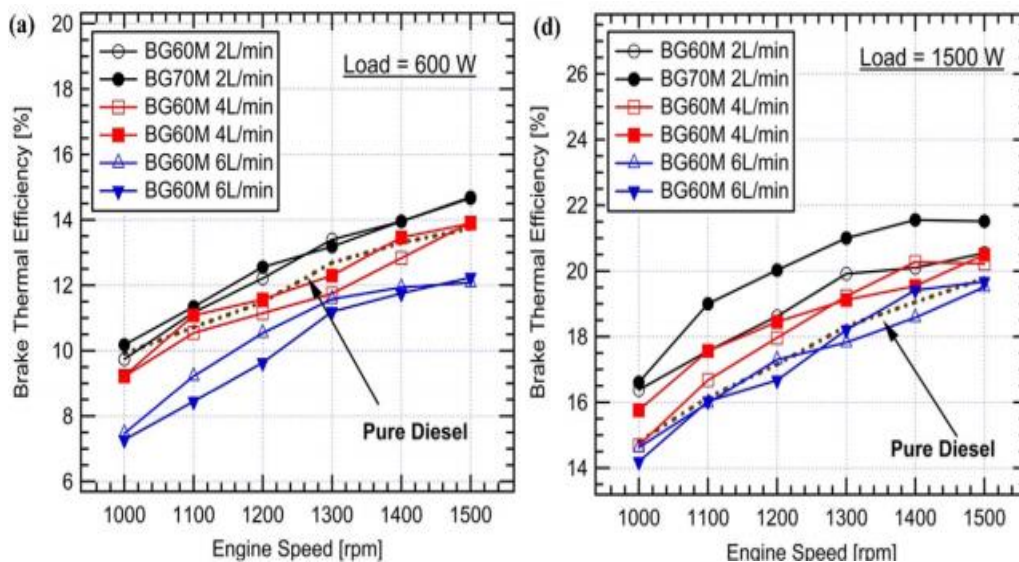
La Figura N°38 muestra que la potencia de salida tiende a aumentar conforme se incrementa las revoluciones. Asimismo, al aumentar la carga, la potencia de salida será mayor. Por lo cual se establece que la potencia es mayor en el modo dual con respecto al modo Diésel.

Figura N° 38: Potencia de salida a distintas cargas [12]



Por otro lado, la Figura N° 39 muestra que el rendimiento se incrementa conforme se incrementan los rpm para dos cargas específicas; además, el rendimiento en modo dual es mayor con respecto al modo Diésel cuando el flujo de biogás es de 2L/min. Así mismo, el rendimiento aumenta significativamente al reducir el flujo de biogás de 6L/min con respecto al flujo de 2L/min.

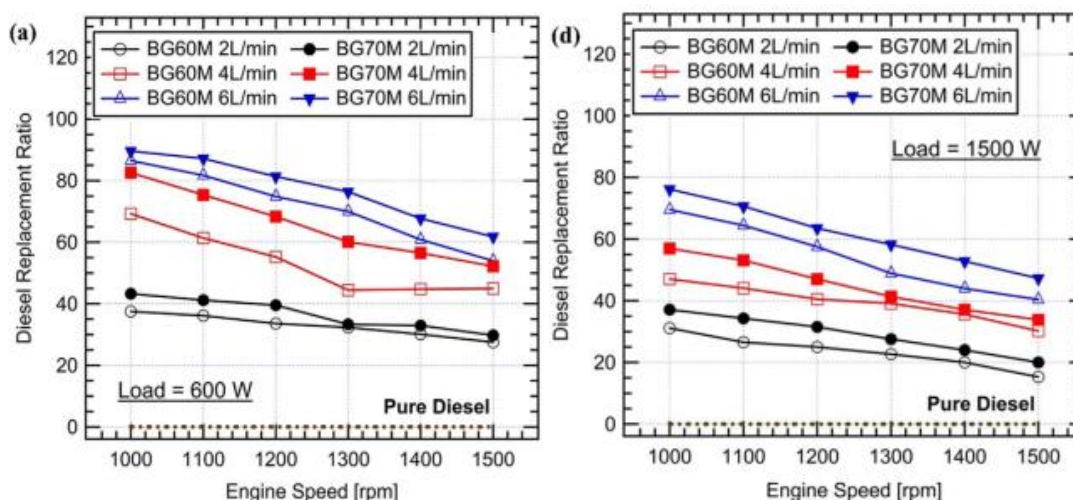
Figura N° 39: Rendimiento efectivo a distintas cargas [12]



Consumo de combustible Diésel

En la Figura N°40 se observa que la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás aumenta conforme se incrementan las rpm. Sin embargo, también se puede apreciar que trabajando con una carga de 600W la sustitución es mayor respecto a la carga de 1500W en todos los rpm, esto quiere decir que hay una tendencia a aumentar la sustitución conforme se reduce la carga.

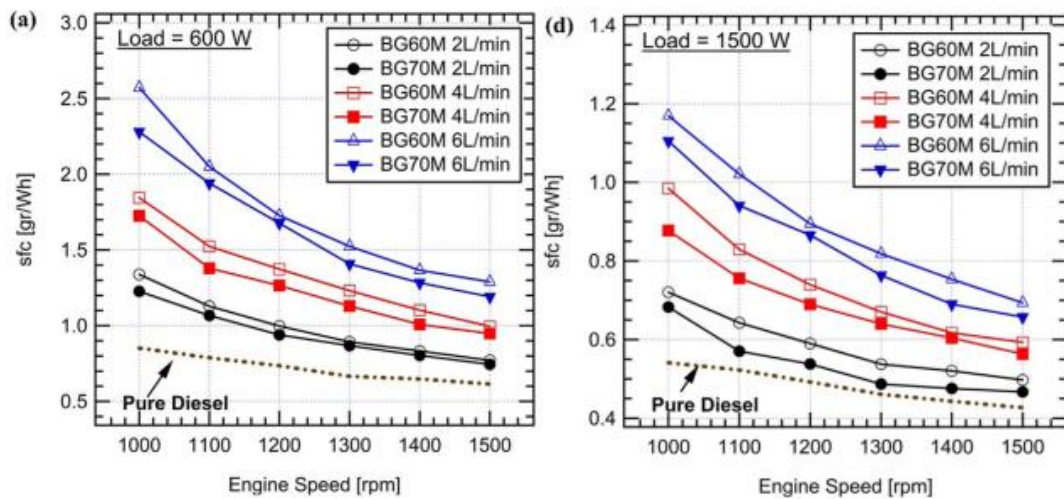
Figura N° 40: Variación de la sustitución de Diésel por biogás [12]



Consumo de combustible Diésel y biogás

En la Figura N°41 se aprecia que el consumo específico disminuye conforme aumenta la carga y las revoluciones. Además, el consumo en ambas cargas y rpm del modo Diésel es menor que el modo dual, siendo menor este a una carga específica de 1500W.

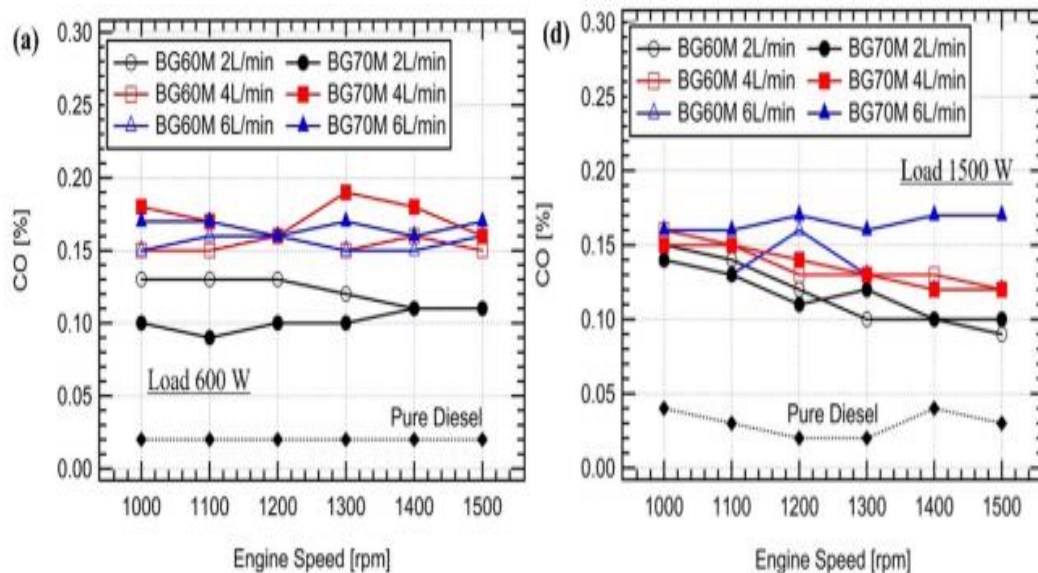
Figura N° 41: Consumo específico a distintas cargas [12]



Emisiones de CO

En la Figura N°42 se observa que la emisión de CO es menor para las 2 cargas en modo Diésel respecto al modo dual. Además, la emisión de CO aumenta conforme se aumenta los rpm y el caudal de biogás; así mismo, la emisión de CO es menor a bajas cargas y menor caudal de biogás como se puede comparar con 6L/min y 2L/min.

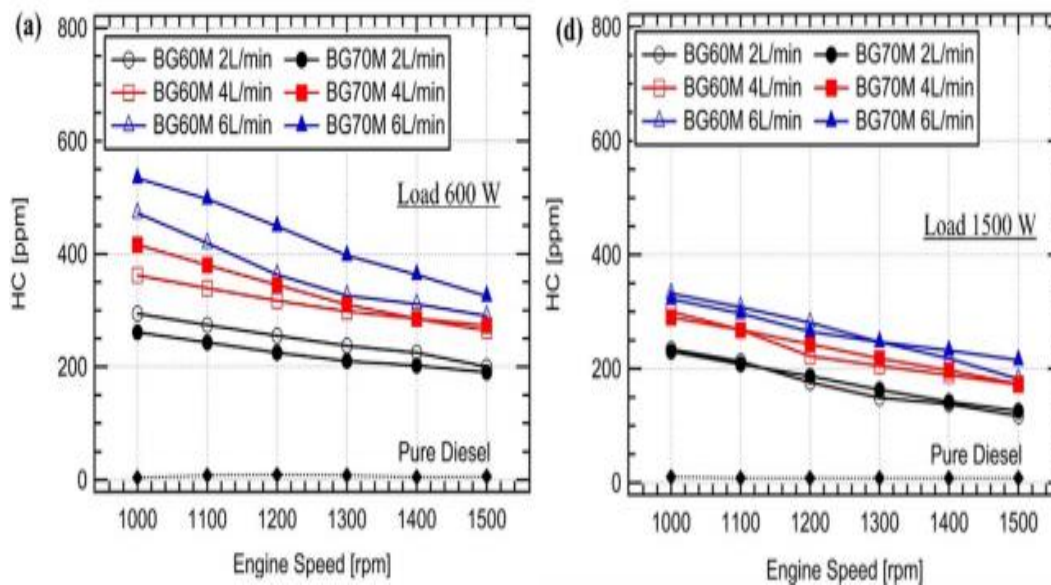
Figura N° 42: Consumo de CO [12]



Emisiones de HC

La Figura N°43 muestra que la emisión de HC aumenta al incrementar el flujo de biogás en todos los rpm, como se puede notar comparando el flujo de 6L/min y 2L/min. Sin embargo, al aumentar la carga y rpm se consigue una reducción de la emisión de HC. También, se observa que la emisiones de HC es casi nula en modo Diésel con respecto al modo dual.

Figura N° 43: Consumo de HC [12]



CAPITULO 4

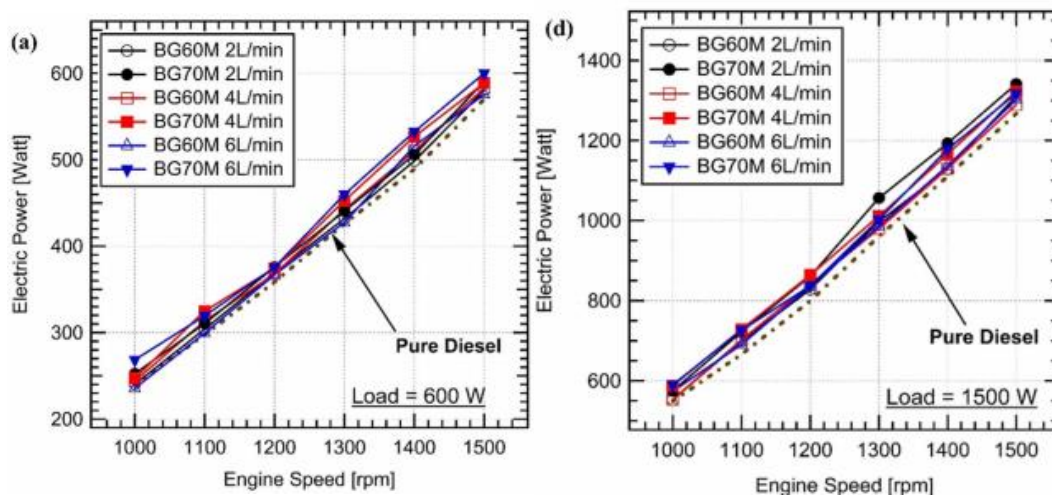
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan el análisis de los resultados obtenidos por los autores que han estudiado la variación de variables, la potencia efectiva, consumo específico de combustible y emisiones de gases contaminantes; procediendo a realizar la interpretación y comparación cuantitativa para establecer cómo influyen dichas variables en el funcionamiento de un motor de combustión interna Diésel.

4.1 Análisis de la potencia efectiva

En el Motor 06 la potencia en modo dual es mayor que en modo Diésel como se ve en la Figura, esto sucede porque en modo Diésel ingresa 528mL/h de combustible Diésel y entrega 5.128 kW; y en Modo Dual ingresa 350.4 mL/h de combustible Diésel, esto sumado al flujo de biogás, en total está entregando 5.615kW, lo cual es un aumento del 9.5%. Esto es debido a la cantidad de metano (70%) del biogás que ingresa a la cámara de combustión.

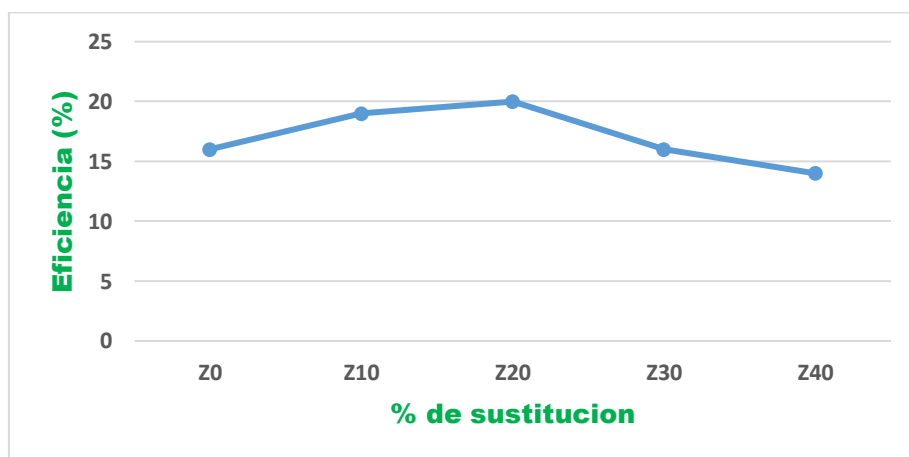
Figura N° 44: Potencia de salida a distintas cargas [12]



Rendimiento

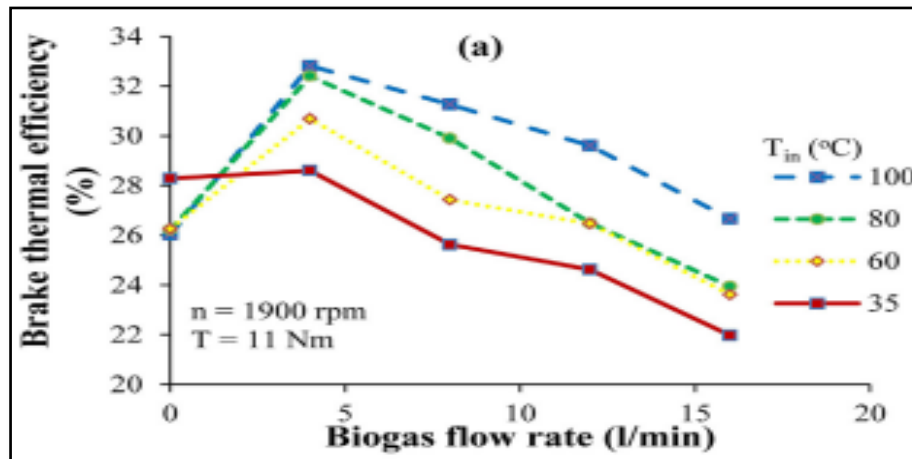
Así mismo, en el Motor 02 el rendimiento efectivo se ve afectado por la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás. Esto es debido al bajo poder calorífico que entrega el combustible biogás con respecto al Diésel, por ende, al aumentar la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás se reduce el rendimiento. Algo similar sucede en el Motor 06, que, al disminuir el flujo de biogás, se logra un mayor rendimiento respecto al modo Diésel. Sin embargo, en el Motor 03 según la figura, se logra observar un aumento del rendimiento de un 2% comparando el 0%(modo Diésel) y 50% de relación de sustitución, esto es debido a que en ese punto se inyecta la cantidad necesaria de combustible Diésel y biogás para una combustión eficiente, a partir de ese punto el rendimiento tiende a reducirse.

Figura N° 45: Eficiencia a distintos modos de operación [9]



Por otro lado, en el Motor 05 trabajando en modo dual, y conforme se aumenta el flujo de biogás se logra tener un incremento del 6% en el rendimiento al precalentar los gases de admisión. Sin embargo, en modo Diésel (sin biogás), se observa que el rendimiento es menor si se precalienta los gases de admisión, esto es debido a que el precalentamiento provoca una reducción de la densidad del aire y el caudal, esto genera mezclas ricas, lo que reduce la eficiencia térmica.

Figura N° 46: Variación del rendimiento efectivo [11]

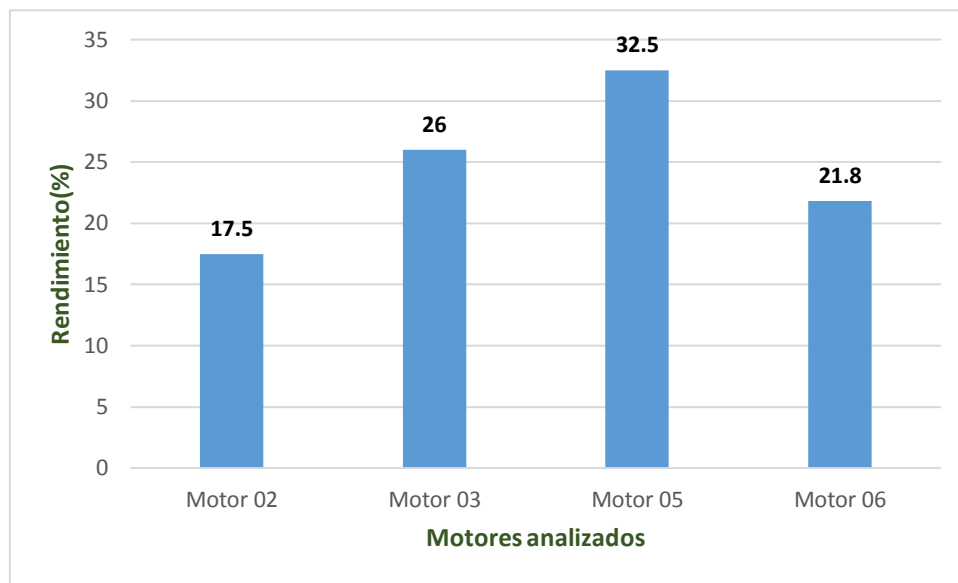


Los siguientes cuadros muestran la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás y flujo de biogás más eficiente respectivamente para lograr el máximo rendimiento.

	Rendimiento (%)	Relación de sustitución (%)	Carga (Watts)
Motor 02	17.5	22	18800
Motor 03	26	50	7300

	Rendimiento (%)	Flujo (L/min)	Carga (Watts)
Motor 05	32.5	4	2190
Motor 06	21.8	2	1500

Figura N° 47: Análisis del rendimiento en cuatro motores



Según los datos obtenidos el Motor 05 muestra el rendimiento más alto con un valor de 32.5%, inyectándole biogás con un flujo de 4L/min y trabajando con una carga de 2190W.

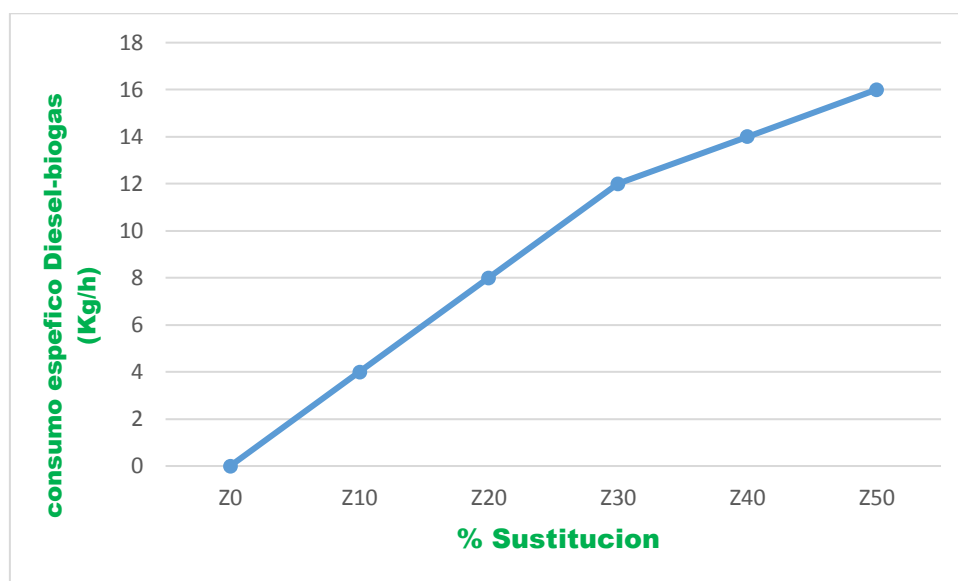
4.2 Análisis del consumo específico de combustible

Consumo específico de combustible biogás

El consumo específico del combustible biogás se puede mantener a un flujo constante según los requerimientos de trabajo del motor, esto se dio en el Motor 01.

Por otro lado, en el Motor 02 según la Figura N° 47, la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás tiende a reducirse conforme se incrementa la carga, ya que a cargas elevadas es necesario mayor flujo de combustible Diésel, por su mayor capacidad de entregar calor.

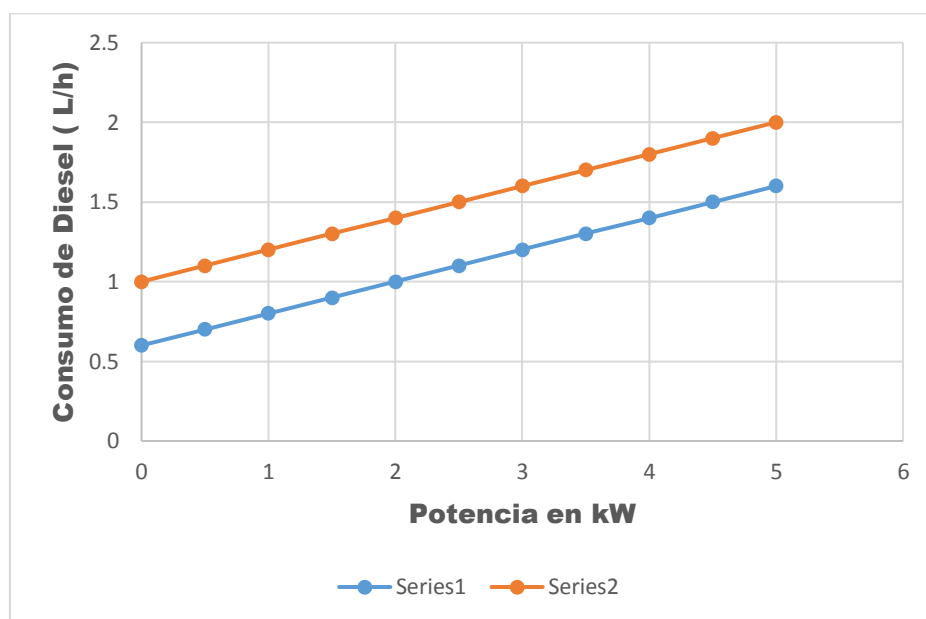
Figura N° 48: Consumo de biogás para el modo dual [7]



Consumo específico de combustible Diésel

Se aprecia que el consumo específico de combustible Diésel aumenta conforme se incrementa la carga, así mismo, la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás aumenta cuando se reduce la carga, esto es debido a que el poder calorífico del biogás reemplaza al poder calorífico del combustible Diésel. Sin embargo, a cargas elevadas el poder calorífico que entrega el biogás (23MJ/kg) no es suficiente, por lo que se tiene que aumentar el flujo de combustible Diésel (42MJ/kg). Contrario a esto, la relación de sustitución de combustible Diésel disminuye al aumentar la carga y velocidad, debido a que en estas condiciones la combustión se realiza en un tiempo mínimo, Esta tendencia en general se dio en el Motor 01, Motor 02, Motor 04, Motor 06.

Figura N° 49: Variación del consumo de combustible Diésel con respecto a la potencia [2]

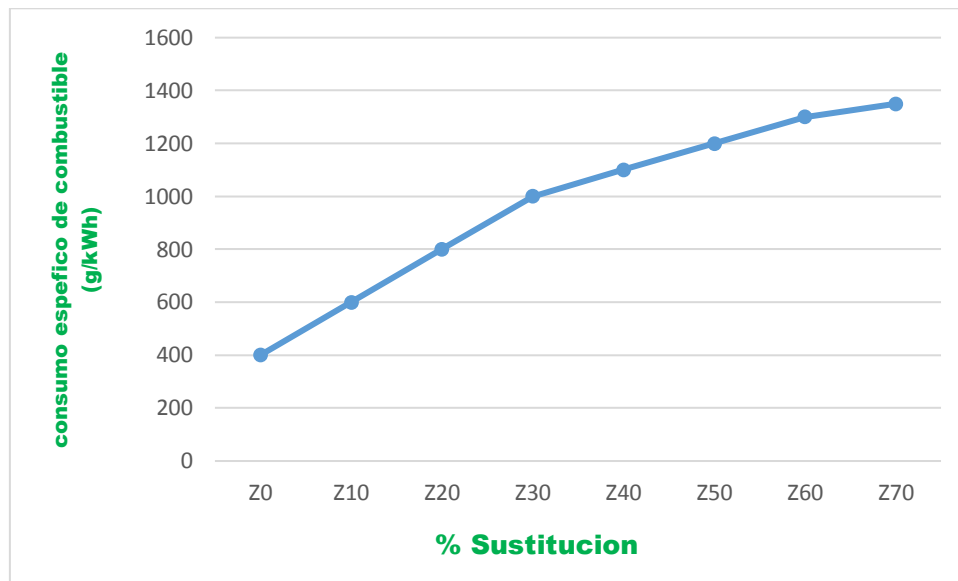


Por otro lado, después de analizar el Motor 05 se deduce el aumento de la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás precalentando los gases de admisión, ya que el precalentamiento hace que la mezcla biogás-aire sea más combustible, por ende, se logra tener una reducción del consumo de combustible Diésel. Así mismo, inyectar mezcla a bajas temperaturas conlleva a producir una combustión incompleta.

Consumo específico de combustible Diésel y biogás

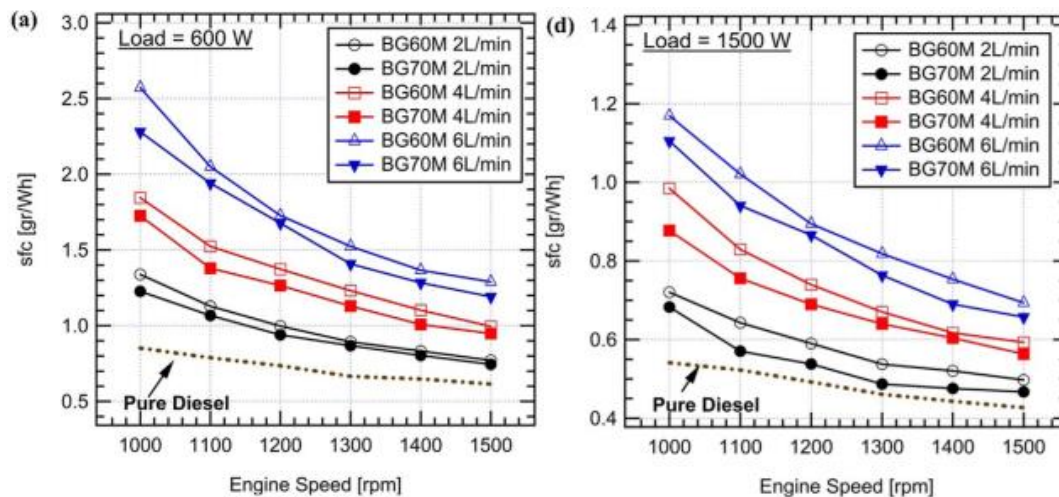
El consumo específico de ambos combustibles tiende a aumentar conforme se incrementa la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás, y esto es principalmente debido al mayor flujo de biogás por su bajo poder calorífico (23MJ/kg). Y esto se puede corroborar en la siguiente figura, ya que en modo Diésel (0% sustitución) el consumo específico es de 450 g/kWh, y en modo dual con 70% de relación de sustitución, este aumenta considerablemente a 1020 g/kWh. Esta tendencia se dio en el Motor 03 y Motor 05.

Figura N° 50: GEF para distintos niveles de sustitución [9]



Así mismo, en el Motor 06 como ya se explicó anteriormente, al aumentar la carga se requiere mayor cantidad de combustible Diésel con respecto al biogás, por ende, se puede concluir que al aumentar las cargas el consumo específico de combustible se reducirá.

Figura N° 51: Consumo específico a distintas cargas [12]



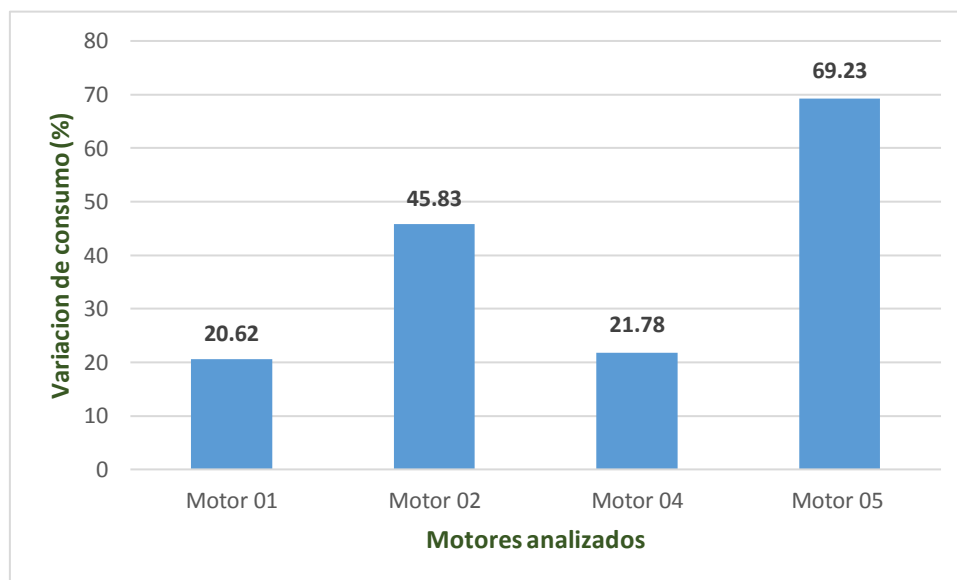
Analizando el consumo específico de combustible Diésel con los datos de las gráficas se establece la relación de parámetros mediante el siguiente cuadro de resumen:

	Modo dual(kg/h)	Modo Diésel(kg/h)	Variación del consumo (%)	Carga(Watts)
Motor 01	1.28	1.61	20.62	4400
Motor 02	3.25	6.00	45.83	11300
Motor 04	7.90	10.10	21.78	11890
Motor 05	0.22	0.70	69.23	2190

Proyectando los datos del cuadro en una gráfica se tiene que el Motor 05 logra un ahorro de 69% de combustible Diésel trabajando en modo dual con respecto al modo Diésel inyectando un flujo de biogás de 16L/min, esto sucede porque está trabajando a una carga baja como es 2.19 kW, y se precalentaron los gases de admisión a una temperatura de 100C° para que la mezcla aire-biogás sea más combustible, como consecuencia se genera una reducción del consumo de combustible Diésel.

Así mismo, el Motor 02 logra un ahorro de 45% de combustible Diésel sin precalentamiento de los gases de admisión trabajando con una relación de sustitución de combustible Diésel por biogás de 46%.

Figura N° 52: Análisis de la variación de consumo de combustible

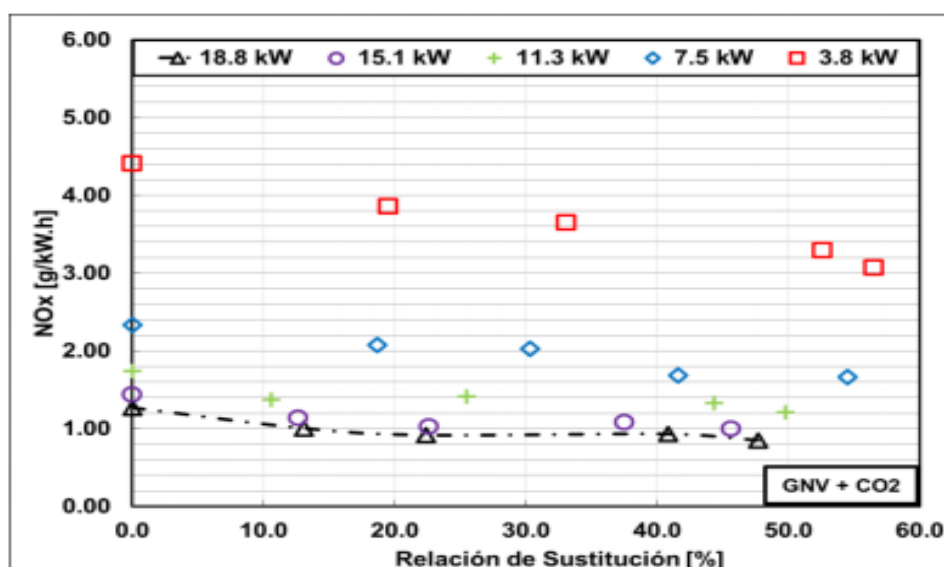


4.3 Análisis de las emisiones de gases contaminantes

Emisiones de NO_x

En el Motor 02 al aumentar la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás se muestra una disminución de las emisiones de NO_x, esto es debido a que el CO₂ del biogás disminuye la temperatura de combustión, lo cual genera una reducción del NO_x. Además, en el Motor 03 y Motor 04 los resultados mostraron el modo dual emite menos NO_x con respecto al modo Diésel para todas las cargas.

Figura N° 53: Emisiones específicas de NO_x para Diésel-biogás [7]

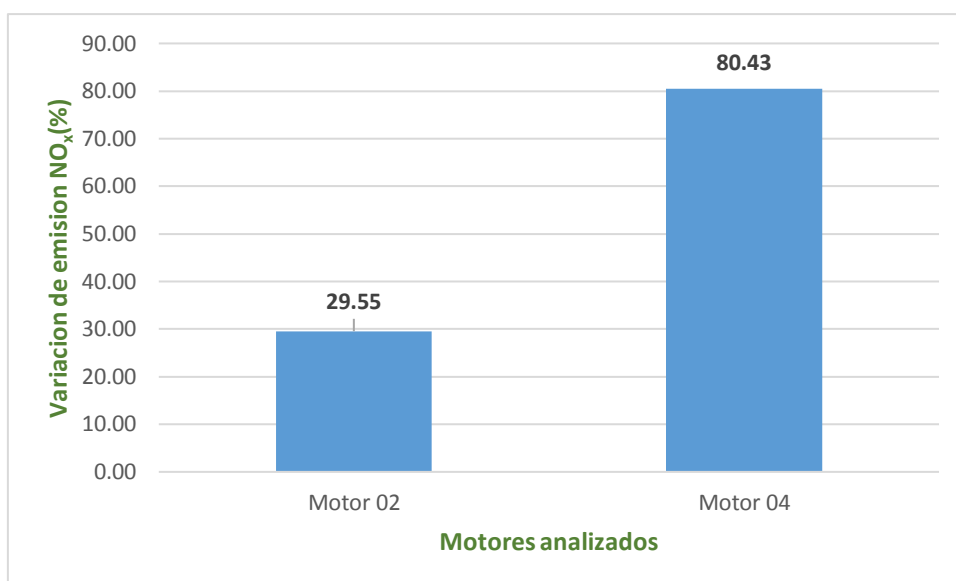


En el siguiente cuadro se tienen los datos de las gráficas analizadas

	Modo dual	Modo Diésel	Variación (%)	Relación de sustitución (%)	Carga
Motor 02	3.1g/kW.h	4.4g/kW.h	29.55	57	3800
Motor 04	1.8ppm	9.2ppm	80.43	75	11890

Así mismo, se tiene que el Motor 04 posee menor emisión de NO_x debido a su mayor relación de sustitución de combustible Diésel por biogás.

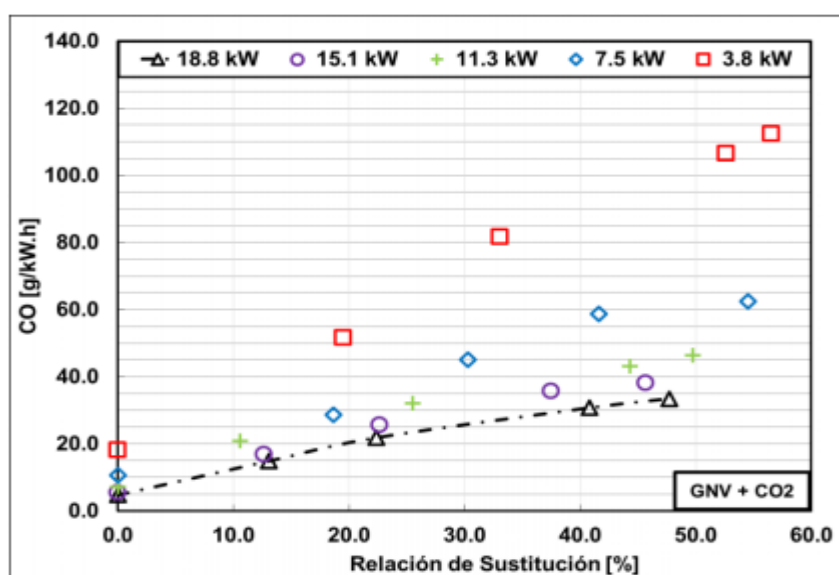
Figura N° 54: Variación de emisiones de NO_x para Diésel-biogás [7]



Emisiones de CO

En el Motor 02, Motor 03, Motor 04 y Motor 06 se genera la misma tendencia a aumentar la emisión de CO conforme se aumenta el flujo de biogás y la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás, esto es debido a la combustión incompleta por la baja temperatura de combustión de la mezcla de aire-biogás y menor número de cetano. Por esta razón se emite más CO en modo dual con respecto al modo Diésel.

Figura N° 55: Emisiones específicas de CO para el modo dual [7]

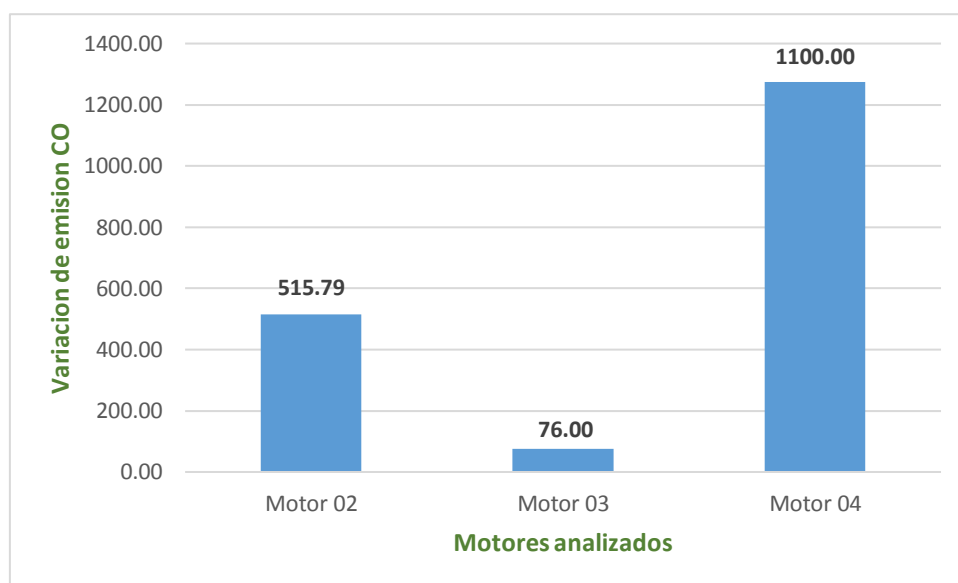


En el siguiente cuadro se muestra el resumen de los valores obtenidos del análisis de tres motores en estudio.

	Modo dual	Modo Diésel	Variación (%)	Relación de sustitución (%)	Carga
Motor 02	117g/kW.h	19g/kW.h	515.79	57	3800
Motor 03	4.5ppm	2.6ppm	76.00	70	7300
Motor 04	0.6ppm	0.05ppm	1100.00	75	11890

Así mismo, se tiene que el Motor 04 posee una mayor variación de emisión de CO debido a su mayor relación de sustitución de combustible Diésel por biogás.

Figura N° 56: Variación de emisiones de CO para el modo dual [7]

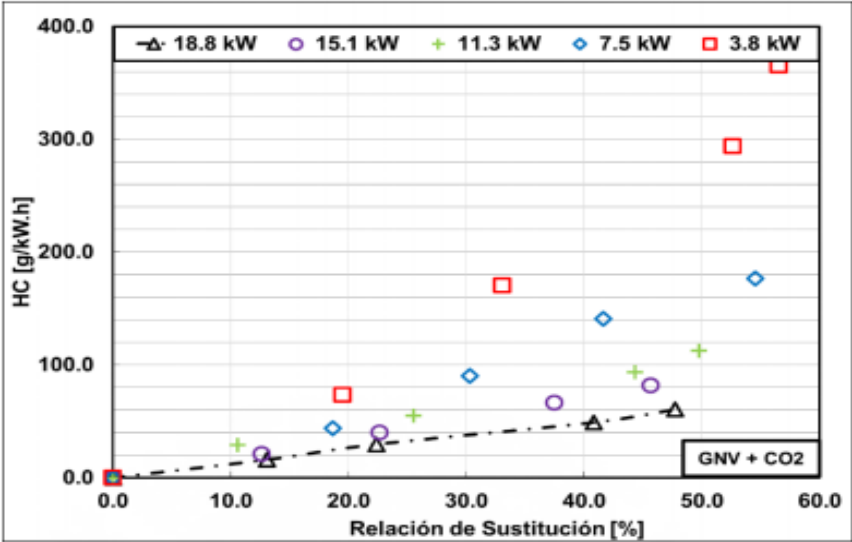


Emisiones de HC

En el Motor 02, Motor 04 y Motor 06 se genera la misma tendencia a aumentar la emisión de HC conforme se aumenta flujo de biogás y la relación de sustitución de combustible Diésel por biogás, esto se debe a que al inyectar mayor biogás ocasiona que la mezcla rica o la concentración de aire fresco sean bajas, además que el biogás tiene menor velocidad de llama, y el CO₂ contenido en el biogás reduce la temperatura de la cámara

de combustión; como consecuencia de estos 3 factores la combustión es incompleta y se emite mayor cantidad de hidrocarburos sin quemar.

Figura N° 57: Emisiones específicas de HC no quemados en modo dual [7]

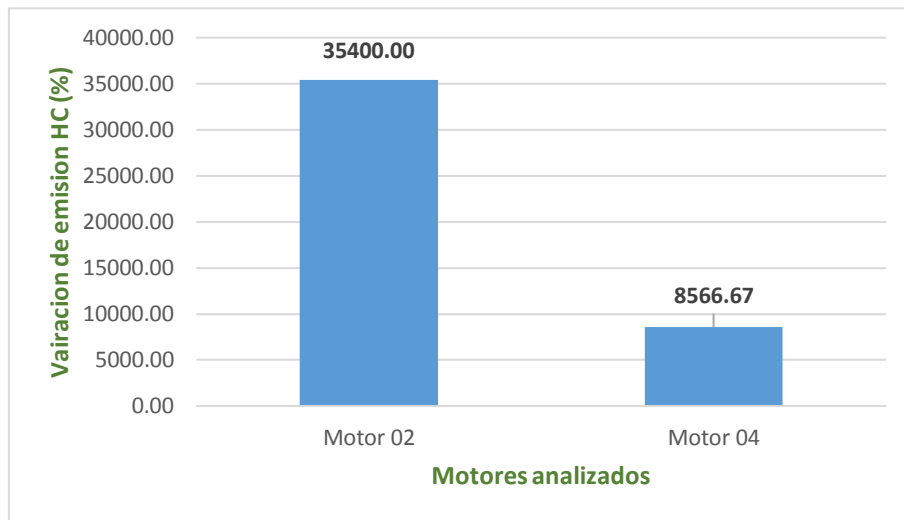


En el siguiente cuadro se tiene los datos de las gráficas analizadas

	Modo dual	Modo Diésel	Variación (%)	Relación de sustitución (%)	Carga
Motor 02	355 g/kW.h	1 g/kW.h	35400.00	57.00	3800
Motor 04	26ppm	0.3ppm	8566.67	75.00	11890

Así mismo, se tiene que el Motor 02 posee una mayor variación de emisión de HC debido a su relación de sustitución de combustible Diésel por biogás y la menor carga con la que trabaja, esto sucede porque a menores cargas la temperatura de combustión es menor, por ende, se genera mayor emisión de HC.

Figura N° 58: Variación de emisiones de HC no quemados en modo dual [7]



Los valores obtenidos en la gráfica tienen como unidades las partes por millón (ppm), Como unidad para cuantificar las concentraciones a nivel molecular, respecto a la variación porcentual de los motores dos y cuatro.

En el siguiente cuadro se muestra la relación óptima de grado de sustitución promedio de combustible respecto a la potencia efectiva, consumo de combustible y las emisiones contaminantes.

CONCLUSIONES

1. Se determinó la factibilidad del uso de biogás para el accionamiento de motores de combustión interna Diésel, debido a que contribuye con la reducción de gases contaminantes manteniendo el desempeño correcto de un motor de combustión interna operando en forma dual Diésel- biogás.
2. Se determinó que el rendimiento máximo de 21.8 % de conforme se aumenta la carga motor respecto a una sustitución promedio de 38.5 %.
3. Se determinó que el consumo específico de combustible Diésel en modo dual genera una reducción promedio de 39.4 % de los motores analizados.
4. Se observa la reducción de las emisiones de NO_x , al aumentar la relación de sustitución, por el contrario las emisiones de CO y HC tienden a aumentar por la disminución de temperatura que se genera al alcanzar una relación de sustitución promedio de 66.5% del Diésel por biogás.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda el estudio de fuentes alternativas de obtención de biogas de material no orgánico, que puedan reemplazar en un porcentaje aceptable al Diésel tradicional, teniendo como referencia la mezcla 75% de gas metano presente en el biogás.
2. Finalmente, se recomendable utilizar el modo dual de combustible, Diésel - biogás debido a que observa la reducción en el consumo de combustible Diésel, lo cual genera ahorro en dinero, y su vez reduce los gases contaminantes, lo cual es de mucha importancia en tiempos tecnológicos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Payri y J. M. Desantes, «Combustibles,» de *Motores de combustión interna alternativos*, Quinta ed., Reverté S.A., 2011, pp. 390-413.
- [2] R. C. Veramendi, «Estudio del comportamiento de un motor Diésel con suministro de biogás,» Tesis Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2004.
- [3] S. Mihic, «Biogas fuel for internal combustion engines,» *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, vol. II, nº 3, Diciembre 2004.
- [4] P. Margareta, J. Owe y W. Arthur, «Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection,» *IEA Bioenergy*, 2006.
- [5] F. Payri y J. M. Desantes, «Clasificación de los MCIA,» de *Motores de combustión interna alternativos*, Sevilla, España, Reverté S.A., 2011, pp. 24-42.
- [6] A. Castillejo, «Sistemas de Inyección en Motores Diésel,» Tesis profesional, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2014.
- [7] J. Mendoza, «Estudio experimental de un motor bi-combustible para el uso de biogás,» Tesis profesional, Pontificie Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2015.
- [8] F. Bermejo y W. Orozco, «Diseño de un mezclador aire-biogás para un motor Diésel turboalimentado,» *Universidad Autónoma del Caribe*, vol. VIII, nº 2, pp. 37-43, Diciembre 2010.

- [9] I. Bedoya, «Estudio de la influencia del sistema de mezclado y la calidad del combustible piloto en el desempeño de un motor dual,» Tesis Magister, Universidad de Antioquia, Antioquia, Colombia, 2007.
- [10] K. Hasan, Y. Mustafa y G. Zafer, «Compressed Biogas-Diésel Dual-Fuel Engine Optimization Study for Ultralow Emission,» Advances in Mechanical Engineering, Estambul, Turquía, 2014.
- [11] S. Feroskhan y S. T. Gopinatha, «Effects of charge preheating on the performance of a biogas-diésel dual fuel CI engine,» Engineering Science and Technology, an International Journal, Tamilnadu, India, 2018.
- [12] H. Ambarita, «Performance and emission characteristics of a small diesel engine run in dual-fuel(diesel-biogas) mode,» Case Studies in Thermal Engineering, Medan, Indonesia, 2017.
- [13] J. Heywood, «Internal Combustion Engine Fundamentals,» McGraw-Hill Book Company, N.Y., Ann Arbor Michigan, 1988 .

Anexo 01: Ficha de Investigación



ANEXO 4

FICHA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD: Ingeniería
CARRERA: Ingeniería Mecánica

1. Título del Trabajo de Investigación propuesto
Influencia del biogás en Motores de Combustión Interna Diésel
2. Indica la o las competencias del modelo del egresado que serán desarrolladas fundamentalmente con este Trabajo de Investigación:

3. Número de alumnos a participar en este trabajo. (máximo 2)
Número de alumnos: 2
4. Indica si el trabajo tiene perspectivas de continuidad, después de obtenerse el Grado Académico d Bachiller, para seguirlo desarrollando para la titulación por la modalidad de Tesis o no.

5. Enuncia 4 o 5 palabras claves que le permitan realizar la búsqueda de información para el Trabajo en Revistas Indizadas en WOS, SCOPUS, EBSCO, SciELO, etc., desde el comienzo del curso y obtener así información de otras fuentes especializadas.
Ejemplo:

Palabras Claves	REPOSITORIO 1	REPOSITORIO 2	REPOSITORIO 3
1.-Motor Combustión			
2.-Diésel - Biogás			
3.-Rendimiento			
4.-Combustible			
5.-Emisiones, Gases			

6. Como futuro asesor de investigación para titulación colocar:
(Indique sus datos personales)
 - a. Nombre: _____
 - b. Código docente: _____
 - c. Correo institucional: _____
 - d. Teléfono: _____
7. Especifica si el Trabajo de Investigación:
(Marca con un círculo la que corresponde, puede ser más de una)
 - a. Contribuye a un trabajo de investigación de una Maestría o un doctorado de algún profesor de la UTP.
 - b. Está dirigido a resolver algún problema o necesidad propia de la organización.
 - c. Forma parte de un contrato de servicio a terceros.

d. Corresponde a otro tipo de necesidad o causa (explicar el detalle):

8. Explica de forma clara y comprensible los objetivos o propósitos del trabajo de investigación

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de un Motor de combustión interna Diesel, usando como combustible Biogas. Para lo cual se analiza parámetros efektivos como potencia y consumo de combustible y las emisiones de gases para su respectivo estudio.

9. Brinde una primera estructuración de las acciones específicas que debe realizar el alumno para que le permita iniciar organizadamente su trabajo

10. Incorpora todas las observaciones y recomendaciones que consideres de utilidad para el alumno y a los profesores del curso con el fin de que desarrollen con éxito todas las actividades

11. Fecha y docente que propone la tarea de investigación

Fecha de elaboración de ficha (día/mes/año): ____/____/____

Docente que propone la tarea de investigación: _____

12. Esta Ficha de Tarea de Investigación ha sido aprobada como Tarea de Investigación para el Grado de Bachiller en esta carrera por:

(Sólo para ser llenada por la Facultad)

Nombre: _____

Código: _____

Cargo: _____

Fecha de aprobación de ficha (día/mes/año): ____/____/____

GLOSARIO

Cetano: Grado de inflamabilidad o auto ignición característico del combustible Diésel utilizados en los motores de combustión interna

Calor específico: Indica la cantidad de energía en forma de calor que hay que proporcionar a una determinada sustancia para elevar su temperatura en una unidad.

Common-rail: Sistema optimizado de inyección de combustible compuesto por tuberías de alta presión que facilita del Diésel hacia la cámara de combustión.

Dodecane: Indica el modo de combustible básico Diésel usado en el funcionamiento de un motor de combustión interna para el análisis según el autor

Dosado: Parámetro que caracteriza un proceso de combustión en cual se relaciona la masa de combustible respecto a la masa de aire presentes en una reacción química.

Estequiométrico: Termino relacionado al balance proporcional fundamentado en la conservación de la materia que se genera en una reacción química de combustión en los motores Diésel.

Gasóleo: también denominado gasoil, es un hidrocarburo líquido de densidad sobre 832 kg/m^3 compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado principalmente como combustible en motores Diésel.

Poder calorífico Inferior: Cantidad de calor desprendido en la combustión completa de combustible, sin contar el calor transformado en vapor de agua.

Relación de Sustitución: Modo de referenciar la proporción de combustible Diésel que se reemplaza por biogás durante el funcionamiento de un motor de combustión interna en modo dual Diésel-biogás expresado en porcentaje.

Venturi: Dispositivo mecánico caracterizado por la reducción de sección que optimiza el ingreso de un fluido compuesto por aire y combustible hacia la cámara de combustión en un motor de combustión interna.